

**Untersuchungen über die Folgebewegung
des menschlichen Auges bei kontinuierlich
und getastet dargebotenen Reizmustern**

Ingrid Sauermann

1965
2



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554805_0047

Aus dem Institut für Animalische Physiologie der Universität
Frankfurt am Main

Direktor: Prof. Dr. med. K. Wezler

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE FOLGEBEWEGUNG DES MENSCHLICHEN
AUGES BEI KONTINUIERLICH UND GETASTET DARGEBOTENEN
REIZMUSTERN

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin

der hohen medizinischen Fakultät
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
zu Frankfurt am Main

vorgelegt von
Ingrid Sauermann
aus Berlin

Frankfurt am Main 1964

Dekan: Prof. Dr. med. H. Frick
Referent: Priv. Doz. Dr. med. G. Vossius
Korreferent: Prof. Dr. med. K.H. Degenhardt
Mündliche Prüfung: 9.3.1965

Einleitung

Um definitive Aussagen über die Gesetzmäßigkeiten zu ermöglichen, nach denen der Ablauf der willkürlichen Bewegung beim Menschen erfolgt, wurden bisher verschiedene motorische Systeme nach regeltechnischen Gesichtspunkten untersucht und dabei besonders das System der Augenbewegung und das der gezielten Handbewegung bevorzugt abgehandelt.

Auf Grund der bisherigen Untersuchungen über das Augenregelsystem wurde folgende Modellvorstellung von seinem funktionellen Aufbau entwickelt: In der Retina, dem Receptionsorgan des Auges, befindet sich im Bereich der Fovea zentralis eine dichte Anhäufung der zapfenförmigen Sinneszellen, von denen - im Gegensatz zur nerval weniger intensiv versorgten Netzhautperipherie - je eine afferente Nervenfaser ausgeht. Das Ziel der Augenbewegung besteht darin, die einfallenden Strahlen des zu betrachtenden Objektes auf diesen Punkt des schärfsten Sehens zu konzentrieren. Jede Abweichung der optischen Achse von der Fovea zentralis - dem Sollwert des Systems - wird von der Retina gemessen und über die aufsteigenden Bahnen des Nervus opticus, Chiasma opticum, Corpus geniculatum laterale und Gratiolet'sche Sehstrahlung den höheren optosensorischen Zentren in der Area striata im Großhirn mitgeteilt, in diesen und den übrigen nachgeordneten Zentren ausgewertet und als Korrekturgröße in Form eines Stellbefehles an die niederen Zentren der Augenmuskelkerne wei-

tergeleitet. Hier werden sie mit Erregungen aus anderen sensorischen Gebieten, z.B. vom Vestibulariskerngebiet und von den Arealen des Frontalhirns, zu einem Stellimpuls an die äußeren Augenmuskeln zusammengefaßt, die nun ihrerseits die geforderte Neueinstellung der optischen Achse durch Drehung des Bulbus bewirken.

Gleichzeitig wird der Erfolg der Muskelbewegung durch die Augenmuskelspindeln überprüft und das Ergebnis der Messung den Augenmuskeln direkt rückläufig zugeführt. Dort wird die Differenz zwischen dem geforderten Sollwert und dem tatsächlichen Istwert der Muskeleinstellung ermittelt und den Augenmuskeln eine entsprechende Korrekturgröße als Stellbefehl zugeteilt.

Man unterscheidet also zwei Regelkreise: Einen Gesamt- oder äußeren und einen ihm untergeordneten inneren, die zusammen ein Kaskadenregelsystem bilden (Vossius (21)). Beide haben gemeinsam als Regelstrecke den Bulbus und als Regelgröße die von den Augenmuskeln auszuführende Bewegung, wobei die Stellgröße des äußeren Regelkreises zugleich als Führungsgröße des inneren dient. Als Meßwerk des äußeren Kreises gilt die Retina, als Regler die höheren optischen Zentren im Occipitalhirn; im inneren Regelkreis stellen die Muskelspindeln das Meßwerk, die Augenmuskeln den Regler dar.

Die Totzeiten dieser beiden Regelkreise unterscheiden sich wesentlich voneinander: Experimentell konnten für den äußeren 100 - 150 msec nachgewiesen werden, für den inneren werden 5 - 10 msec angenommen.

Der Ablauf der Augenfolgebewegung vollzieht sich nicht nur kontinuierlich, sondern mit sakkadischen Sprüngen in Zeitabständen von mindestens 70 - 120 msec. Das Auftreten dieser Korrektursprünge läßt sich nur aus dem Aufbau der die Informationen auswertenden höheren Zentren im Occipitalhirn erklären, die ihren unterschiedlichen Funktionen nach ein zusammengesetztes System bilden. Dieses besteht aus zwei parallelen Übertragungszweigen: Während der eine nur auf die Geschwindigkeitskomponente des Erregungsmusters anzusprechen scheint und Vorhalteeigenschaften, aber nur eine niedrige Grenzfrequenz von 3 - 5 Hz besitzt, mißt der andere die Winkelabweichung des Sehobjektes von der Fovea centralis, überlagert entsprechende Korrekturbefehle in den schon oben erwähnten diskontinuierlichen Abständen dem Ausgang des ersten Zweiges und gleicht so die momentanen Fehler in der Augeneinstellung aus. (Abb.1)

Auch anatomisch sind diese beiden Zentren offensichtlich gegeneinander abgegrenzt, wie aus dem isolierten Ausfall der kontinuierlichen Folgebewegung bei pathologischen Prozessen im Occipitalhirn geschlossen werden kann (Zahnradphänomen (3)).

Da nach Untersuchungen von Vossius (21) die Einstellzeit mindestens das 6 - 10fache der Totzeit des Regelkreises beträgt, kann für die Ausführung der vom diskontinuierlichen Zweig bewirkten, sehr schnell erfolgenden Korrektursprünge nur der Unterregelkreis in Frage kommen, da der Hauptregelkreis auf Grund seiner langen Totzeit dafür zu träge ist.

Nach den bisherigen Erkenntnissen über das System der Augenregelbewegung beantwortet das Auge den Reiz eines vorgegebenen sinusförmigen Signals nach einer Reaktionszeit von ca. 300 msec (Sünderhauf (13), Vossius (17)) mit einer ebenfalls sinusförmigen, durch sakkadische Korrektursprünge unterbrochenen Bewegung. Bei niedrigen Frequenzen des Erregungsmusters tritt in der Folgebewegung ein schwach positiver Phasenwinkel auf, d.h. das Auge eilt der vorgegebenen Bewegung voraus; diese Erscheinung verliert sich mit steigender Frequenz des Musters und der Phasenwinkel wird in zunehmendem Maße nacheilend. Die bei sehr langsamen Vorgabefrequenzen deutlich vergrößerte Amplitude der Folgekurve nimmt bei höherer Mustergeschwindigkeit sehr schnell ab und strebt endlich bei etwa 3.0 Hz gegen Null (Westheimer (24), Drischel (2), Sünderhauf (13), Vossius (21)).

Auch getastet dargebotenen sinusförmigen Reizmustern vermag das Auge kontinuierlich zu folgen (Westheimer (24)).

Versuche über die sakkadische Übergangsfunktion der Augenbewegung (Westheimer (24), Sünderhauf (13), Vossius (17)) ergaben, daß die Einstellung des Bulbus auf das Zielobjekt entweder in Form eines aperiodisch gedämpft erscheinenden Vorganges oder durch gedämpftes oszillatorisches Einschwingen erfolgt.

Nach Untersuchungen von Mayne (6), Küpfmüller und Poklewski (5) sowie Vossius (15) über das Regelsystem der Willkürbewegung der Hand, setzt sich dieses ähnlich dem

der Augenregelbewegung aus einem äußeren und einem ihm untergeordneten inneren Regelkreis zusammen, die kaskadenförmig miteinander verbunden sind. Regelstrecke ist der Arm, Regelgröße die vom Arm auszuführende Bewegung. Die Retina als Fühler des äußeren Regelkreises mißt die Abweichung des Armes vom Ort der gewünschten Einstellung und teilt sie dem in den höheren Zentren des Großhirns gelegenen Regler mit, der sich analog dem des Augenregelsystems ebenfalls aus einem kontinuierlichen und einem diskontinuierlichen Anteil zusammensetzt. Im kontinuierlich arbeitenden Teil erfolgt zunächst eine Analyse des Kurvenverlaufes, auf Grund deren das Muster in einem folgenden Glied neugebildet wird und dann zur Ausgabe an die Rückenmarkszentren gelangt (Vossius (22), (23)). An diese Musterausgabe ist eine Speicher- und Vorhersagefähigkeit gekoppelt (Hummel (4)). Durch das parallel zum kontinuierlichen Zweig arbeitende Tastfilter werden Abweichungen vom geforderten Sollwert ausgeglichen und seine diskontinuierlich erfolgenden Korrektursprünge zur Verbesserung des Musterbildes gleichzeitig dem Zentrum für die Musteranalyse mitgeteilt. Anschließend wird das nachgebildete Muster in Form eines Stellbefehles über die motorischen Vorderhornzellen des Rückenmarks und die efferenten Nervenbahnen der Armmuskulatur zugeführt, deren Einstellung wiederum von der Retina gemessen und rückgemeldet wird. Damit ist der äußere Regelkreis geschlossen.

Als Rezeptoren des inneren Regelkreises kontrollieren die proprioceptiven Sinnesorgane der Armmuskulatur, die Fühler der Tiefensensibilität der Gelenke und die der Hautsensibilität die vom Gesamtregelkreis durchgeführte Muskeleinstellung und teilen ihre Informationen über eventuelle Fehlleistungen dem in den entsprechenden Rückenmarkszentren liegenden Regler mit. Stellglied sind wiederum die Armmuskeln.

In seinem Wirkungsmechanismus als Proportional-Integral-regelkreis entspricht der Unterregelkreis der Handbewegung dem der Augenbewegung (Vossius (22)).

Nach Untersuchungen von Altrock (1) über den Frequenzgang der menschlichen Handbewegung unterscheidet sich dieser mit seiner oberen Frequenzgrenze von 10 Hz für einfache Sinusschwingungen wesentlich von dem der Augenbewegung, dessen Grenzfrequenz bei etwa 3 Hz liegt. Dabei zeigt die Folge der Hand bis zu 2 Hz einen deutlichen Phasenvorhalt gegenüber der Vorgabe, der sich allerdings erst im Verlauf des Versuches infolge der Speicher- und Vorhersageeigenschaft des kontinuierlichen Filters herausbildet. Bis zu 3 Hz erfolgt die Antwort weiterhin frequenzgetreu, allerdings mit zunehmender Verkleinerung der Amplitude. Während diese bei der Augenbewegung sehr schnell gegen Null strebt, wenn die Frequenz von 3 Hz überschritten wird, beobachtet man bei der Handbewegung bis zu 4 Hz nochmals ein vorübergehendes Anwachsen der Amplitudengröße. Besonders bemerkenswert ist hierbei, daß die Handbewegung bei vorgegebener Sinusschwingung oberhalb der Grenze von 3 Hz nicht mehr frequenzgetreu ,

sondern bis zu 5 Hz mit einer Erhöhung, über 5 Hz mit einer Verringerung der Folge- gegenüber der Vorgabefrequenz ausgeführt wird.

bietet man statt eines einfach sinusförmigen Musters Mischungen mehrerer Sinusschwingungen an, so entstehen je nach Wahl der Phasen- und Frequenzbeziehungen subjektiv einfacher oder komplizierter erscheinende, sich periodisch wiederholende oder nichtperiodische Kurvenbilder. (Beschreibung folgt).

Versuche von Vossius (22), (23) und Kummel (4) zeigen, daß die obere Frequenzgrenze der Handfolgebewegung von der Schwierigkeit des vorgegebenen Signals abhängt und daß sich auch das Phasen- und Amplitudenverhalten mit der Art des Vorgabemusters ändert. Bei einfachem Erregungsmuster und niedrigen Frequenzen bildet sich auch hier während des Versuches nach einiger Zeit ein vorseilender Phasenwinkel als Ausdruck der Vorhersagefähigkeit heraus, der aber mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad des Erregungsreizes und mit steigender Frequenz der Grundwellengeschwindigkeit geringer wird. Gleichzeitig läßt auch die Qualität der Wiedergabe durch eine zusehende Verkleinerung der Amplituden, durch den Ausfall einzelner Frequenzen einerseits und zusätzliche Frequenzneubildungen andererseits, erheblich nach.

Es hat sich erwiesen, daß die Vorgabe nicht nach ihrem Frequenzinhalt, sondern nach ihrer Form analysiert und aktiv nachgebildet wird. Dafür spricht auch die Tatsache, daß das Erinnerungsvermögen für den Verlauf des Musters besser ist, als für die Frequenz, in der es angeboten wird.

Mit der Analyse erfolgt zugleich eine Speicherung des Vorgabesignals in den höheren Zentren im Cortex. Bei zunehmender Kompliziertheit und steigender Frequenz des Kurvenbildes verliert sich allmählich die Fähigkeit zur Erkennung und aktiven Nachbildung des Reizmusters und auch die Möglichkeit der Speicherung wird unvollkommen. Dennoch muß eine gewisse Langzeitvorhersage bestehen bleiben, da sich kein allzu großer Phasennachhalt zwischen Vorgabe und Folge herausbildet. Bei nichtperiodischem Erregungsmuster dagegen findet die Beantwortung der Vorgabe als Folgeregelung mit deutlich größerem Phasennachhalt statt, da die Predictionseigenschaft des Systems durch die Unvorhersagbarkeit des Musters nicht zur Wirkung kommen kann.

Auch unter stroposkopischer Kontrolle der Handbewegung erfolgt bis zu gewissen Tastabständen ein ungestörter Ablauf der Folgebewegung (Vossius (15)).

Aus Versuchen von Wezel (25) mit getastet dargebotenen Vorgabekurven ergab sich für die Regelbewegung der Hand, daß das Erregungsmuster - entsprechend dem Abtasttheorem von Shanon - mit mindestens dem Doppelten der höchsten in ihm enthaltenen Frequenz abgetastet werden muß, um eine sinnvolle Folge zu erzielen. Diese Abtasthäufigkeit von zwei Punkten pro Schwingung genügt allerdings nur bei langsamen Signalen, mit steigender Frequenz der Vorgabe werden jedoch bis zu vier Abtastungen pro Schwingung erforderlich. Außerdem unterliegt dieses Grenztastverhältnis individuellen Schwankungen. Auch bei getasteter Vorgabe der Reizmuster findet in den

höheren Zentren eine Formenanalyse, Speicherung und aktive Musternachbildung statt, ebenso läßt sich eine Vorhersagefähigkeit experimentell nachweisen.

Da nach den bisherigen Ergebnissen Aufbau und Wirkungsweise der Regelkreise der Augen- und der gezielten Handbewegung in wesentlichen Punkten übereinstimmen, soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, ob die von Hummel (4) und Wezel (25) gefundenen Gesetzmäßigkeiten bei der Willkürbewegung der Hand auch für die Augenregelbewegung zutreffen.

M e t h o d i k

Die Registrierung der Augenbewegung erfolgte in Anlehnung an die Versuchsanordnung von Richter (9) sowie Stark und Sandberg (11).

Die Versuchsperson setzte ein brillenähnliches Gestell auf, an dem in geringem Abstand von der Cornea des beobachtenden linken Auges zwei Infrarotlämpchen so angeordnet wurden, daß an der nasalen und temporalen Grenze zwischen Iris und Sklera je eine kleine kreisförmig beleuchtete Fläche entstand. Da diese beiden anatomischen Substrate die einfallenden Strahlen verschieden stark zurückwerfen, änderte sich mit Drehung des Bulbus die Intensität des reflektierten Lichtes. Diese wurde durch zwei zwischen den Lämpchen angebrachte Solarzellen gemessen, die einen mit der Beleuchtungsstärke linear ansteigenden Strom abgaben. Durch ihre extrem kurze Anstiegszeit von nur 20 Microsekunden eigneten sich die Solarzellen besonders für die Registrierung der untersuchten Frequenzbereiche. Der abgeleitete Aktionsstrom durchlief einen Gleichspannungsverstärker und wurde dann synchron mit dem Erregungsmuster auf zwei verschiedenen Kanälen eines Direktschreibers (Cardirex der Fa. Siemens) registriert. (Abb. 2)

Alle untersuchten Erregungsmuster wurden auf elektrischem Wege erzeugt: Die rein sinus- und dreieckförmigen Signale wurden einem Tieffrequenzgenerator der Fa. Hewlett and Packard /Californien entnommen, die pe-

periodischen und nichtperiodischen Mischkurven entstanden durch Addition verschiedenfrequenter, aber amplitudengleicher Sinusschwingungen in einem Widerstandsadditionsnetzwerk (Hummel (4)).

Das Reizmuster wurde mittels eines Spiegelgalvanometers und einer Spaltlampe als vertikalstehende 3 mm breite und 30 mm hohe, horizontal hin- und herwandernde Lichtmarke auf einen kreisbogenförmig gekrümmten Schirm projiziert, dessen Radius 1500 mm betrug. Im Mittelpunkt dieses Kreises saß die Versuchsperson. Durch Variation der an die Glühbirne der Spaltlampe angelegten Spannung konnte die Helligkeit des Lichtsignals beliebig verändert werden.

Zur Tastung des Vorgabemusters wurde der Lichtstrahl der Spaltlampe durch eine von einem Synchronmotor angetriebene Sektorenscheibe unterbrochen, über deren Peripherie in jeweils konstanten Abständen eine variable Anzahl von radiären Einschnitten verteilt war. Die genaue Registrierung der etwa 10 msec dauernden Lichtblitze erfolgte gleichzeitig mit Vorgabe und Folge auf einem getrennten Kanal des Cardirex.

Die Versuche wurden von zwei männlichen, normalsichtigen Versuchspersonen im Alter von 26 und 37 Jahren ausgeführt.

Zur Vermeidung willkürlicher Bewegungen wurde der Kopf der im völlig abgedunkelten Raum sitzenden Versuchspersonen durch "Einbeißen" in ein individuell aus thermoplastischem Abdruckmaterial angefertigtes Beißbrett fixiert. Während der Versuche wurde für absolute Ruhe ge-

sorgt und die Versuchsperson aufgefordert, mit größtmöglicher Schnelligkeit und Genauigkeit dem vorgegebenen Lichtsignal zu folgen und bei etwaiger Ermüdung den Versuchsleiter durch ein vorher festgelegtes Klopfzeichen davon in Kenntnis zu setzen.

Während der ersten Versuche wurde das rechte Auge durch eine Kappe abgedeckt und nur die Bewegung des beobachtenden linken Auges registriert. Nachdem aber Vergleichsversuche bestätigt hatten, daß in der Folgebewegung keinerlei Unterschiede zwischen ein- oder zweiaugigem Sehen auftreten, wurde später unter Sicht beider Augen experimentiert, jedoch weiterhin nur die Reaktionen des linken Auges aufgezeichnet.

Vor Beginn und am Ende eines jeden Versuches wurde eine genaue Amplitudeneichung über 12° des Gesichtsfeldes in diskreten Sprüngen von 2° vorgenommen, um den Bereich ausreichender Linearität zu finden, in dem dann das Erregungsmuster mit einer Amplitudengröße von 6° vorgegeben wurde (Abb. 3).

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte zunächst für alle Versuchsserien optisch quantitativ auf das Frequenz- und Amplitudenverhalten der Folge gegenüber der Vorgabe. Danach wurden aus charakteristischen Versuchen Kurvenabschnitte ausgewählt und mit Hilfe eines elektronischen Digitalrechners ausgewertet: ¹⁾

¹⁾ Die Berechnungen wurden im Deutschen Rechenzentrum in Darmstadt mit Hilfe des Digitalrechners vom Typ JBM 704 durchgeführt. An dieser Stelle möchte ich Herrn Priv. Doz. Dr. med. G. Vossius und Herrn Dipl. Ing. H. Schellhaas für die Aufstellung der Programme und die Ausführung der Rechnungen herzlich danken.

Für die verschiedenen periodischen und nichtperiodischen Mischkurven wurden die Leistungsspektren und Phasengänge berechnet. Dazu mußte der Amplitudenverlauf der zu untersuchenden Folgebewegung mit einem mechanischen Ablesegerät in konstanten Abständen ermittelt werden und auf Lochkarten übertragen werden. Die Anzahl dieser Stützstellen wurde jeweils so gewählt, daß das Muster bei ganz langsamer Vorgabe noch mit 50 Tastpunkten pro sec, bei schnellerem Zeitablauf mit 100 Tastpunkten pro sec erfaßt wurde.

Für jede Versuchsart konnten nur so viele Versuche rechnerisch ausgewertet werden, wie es für den sehr zeitraubenden Ablese- und Übertragungsvorgang noch vertretbar war. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit mehr als 120 000 Einzelwerte abgelesen und in Lochkarten gestanzt. Leider war es auf Grund der sehr aufwendigen Rechenverfahren und der begrenzten Rechenzeit nicht möglich, das gesamte Kurvenmaterial auf elektronischem Rechenwege zu analysieren, deshalb mußte sich dieses Verfahren auf besonders typische Kurvenabschnitte beschränken.

V e r s u c h e u n d i h r e E r g e b n i s s e

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt fünf verschiedenartige Erregungsmuster untersucht, die den Versuchspersonen zunächst kontinuierlich, in späteren Versuchen getastet dargeboten wurden. So entstanden folgende Versuchsreihen, deren Muster später im einzelnen beschrieben werden:

I) kontinuierliche Vorgabe.

- a) Vorgabe eines aus drei harmonischen Schwingungen zusammengesetzten "einfachen" periodischen Musters.
- b) Vorgabe eines aus drei harmonischen Schwingungen zusammengesetzten "komplizierten" periodischen Musters.
- c) Vorgabe eines aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzten periodischen Musters.
- d) Vorgabe eines aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzten nichtperiodischen Musters vom Typ A.
- e) Vorgabe eines aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzten nichtperiodischen Musters vom Typ B.

II) getastete Vorgabe.

Alle unter I aufgeführten Muster wurden mit Tastfrequenzen von 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0 und 12.0 Hz dargeboten.

Da durch den Phasen- und Amplitudengang der Folgekurven oft der Zusammenhang zwischen Vorgabe und Folge für die rein betrachtende Auswertung nicht erkennbar war, bereitete die Beurteilung der Versuchsergebnisse einige Schwierigkeiten. Deshalb konnte auch die optische Sichtung nur recht unzureichenden Aufschluß über die Qualität der Folgebewegung geben, und eine definitive Aussage darüber mußte der mathematischen Analyse vorbehalten bleiben. Diese erforderte aber für jeden einzelnen Kurvenabschnitt eine so große Datenmenge, daß nur die besten Beispiele der mathematischen Untersuchung unterzogen werden konnten. Um bei der großen Variabilität der errechneten Werte zusammenhängende Aussagen zu ermöglichen, wurden die vorliegenden Ergebnisse nach folgenden Gesichtspunkten in vier Gruppen eingestuft:

- a) Wiedergabe gut erhalten
- b) Ungenauigkeit im Einhalten der geforderten Frequenzen
- c) Auftreten anderer Frequenzanteile
- d) Verwischung der Frequenzen, Muster nicht erkennbar.

Außerdem muß bei der Bewertung der Amplitudenverhältnisse berücksichtigt werden, daß sich das kontinuierliche und das sakkadische System der Augenbewegung in ihrer Wirkungsweise überlagern und damit Verzerrungen im Kurvenlauf hervorrufen können.

Ia) Vorgabe eines aus drei harmonischen Schwingungen zusammengesetzten "einfachen" periodischen Musters.

Das "einfache" periodische Muster setzte sich aus drei amplitudengleichen Sinusschwingungen zusammen, deren Frequenzen sich zueinander wie 1 : 2 : 3 verhielten. Die Phasen der 2. und 3. Schwingung wurden gegenüber der Grundwelle um 90° bzw. 180° verschoben. Dadurch entstand ein symmetrisches Muster, das alle Versuchspersonen als subjektiv leicht erfaßbar bezeichneten (Abb. 4a). Dieses Erregungsmuster wurde mit Grundwellengeschwindigkeiten von 0.25, 0.5, 0.75 und 1.0 Hz dargeboten.

Schon bei der optischen Sichtung der Versuchsergebnisse zeigt sich, daß beide Versuchspersonen das Reizmuster bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 0.25 Hz einwandfrei reproduzieren. Diese Beobachtung wurde durch die mathematische Analyse bestätigt; alle drei Schwingungen des Signals treten entsprechend der Vorgabe im Leistungsspektrum als eindeutige Frequenzlinien im geforderten Bereich auf (Abb. 5). Auch die Größen der Amplituden stimmen mit denen der Vorgabe überein, während die Untersuchungen der Phasenbeziehungen für die Grund- und Oberwellen nacheilende Phasenwinkel ergeben.

Mit zunehmender Grundwellengeschwindigkeit (0.5 und 0.75 Hz) werden zwar alle drei Frequenzen noch genau eingehalten, aber die Amplituden zeigen bereits eine deutliche Verminderung ihrer Größe gegenüber den Soll-

werten. Mit steigender Frequenz wird dieser Abfall der Amplitudenwerte noch deutlicher und bestätigt damit die Ergebnisse der von Vossius (21), Drischel (2), Erincker (14) und Sünderhauf (13) durchgeführten Untersuchungen mit rein sinusförmigen Mustern. Gleichzeitig vergrößert sich auch der Phasennachhalt erheblich. Außer den geforderten Schwingungen treten zusätzlich kleine, in der Vorgabe nicht enthaltene Frequenzanteile im Spektrum auf, deren Anzahl und Höhe mit dem Anwachsen der Mustergeschwindigkeit ebenfalls zunimmt (Abb. 6).

Schließlich wird die Form des Musters bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 1.0 Hz nur noch in ihren typischen Grundzügen mit stark nachteilendem Phasenwinkel reproduziert und im Leistungsspektrum erscheint lediglich im Bereich der Grundfrequenz eine Schwingung von nennenswerter Amplitude. Gelingt es der Versuchsperson infolge höherer Geschwindigkeit des Musters nicht, diesem vorbildgetreu zu folgen, so versucht sie häufig durch Überdehnen der ausgeprägtesten Schwingung den Anschluß an die Vorgabe wiederzufinden.

Eine Aufstellung der Histogramme über das Korrektursprungverhalten der Augenregelbewegung bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 0.5 Hz läßt erkennen, daß ein Zeitabstand von ca. 240 msec zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sprüngen in auffälliger Weise bevorzugt wird. Dieses Maximum verliert sich jedoch für höhere Mustergeschwindigkeiten, und die Sprungintervalle variieren dann stärker.

Ib) Vorgabe eines aus drei harmonischen Schwingungen zusammengesetzten "komplizierten" periodischen Musters.

Das "komplizierte" periodische Muster setzte sich ebenfalls aus drei amplitudengleichen Sinusschwingungen zusammen, deren Frequenzen sich wie 1 : 2 : 3 verhielten. Im Gegensatz zum "einfachen" periodischen Muster wurden jedoch die Anfangsphasen der 2. und 3. Schwingung gegenüber der Grundwelle um jeweils 270° verschoben (Abb. 4b).

Der daraus resultierende Kurvenverlauf war nach übereinstimmenden Angaben der Versuchsperson subjektiv schwerer zu befolgen als der der vorangegangenen Versuchsreihe. Auch dieses Signal wurde mit Grundwellengeschwindigkeiten von 0.25, 0.5, 0.75 und 1.0 Hz dargestellt und nach den gleichen Gesichtspunkten wie das "einfache" periodische Reizmuster ausgewertet.

Nach der optischen Beurteilung stimmt bei einer Grundwellenfrequenz von 0.25 Hz die Vorgabe mit der Folge gut überein, und auch die errechneten Frequenz- und Amplitudenwerte entsprechen mit nur geringfügigen Schwankungen denen des Erregungsmusters. Der Phasennachhalt ist allerdings größer als beim "einfachen" periodischen Signal gleicher Frequenz.

Mit dem Ansteigen der Grundwellengeschwindigkeit auf 0.5 Hz ändert sich das optische Bild der Folgebewegung nur unwesentlich. Neben den genau eingehaltenen drei geforderten Schwingungen, deren Amplituden deutlich verringert sind, zeigen sich aber im Leistungsspektrum zusätzliche Frequenzen um 0.75, 2.0 und 2.5 Hz, der Phasennachhalt nimmt erheblich zu.

Bei weiterer Erhöhung der Mustergeschwindigkeit auf 0.75 Hz läßt die Qualität der Folgebewegung zusehends nach und nur die Grund- und 2. Oberwelle werden erkennbar, die 1. Oberwelle aber häufig nur mit einer sehr geringen Amplitude wiedergegeben. Gleichzeitig tritt neben mehreren kleinen Schwingungen eine sehr ausgeprägte Frequenzneubildung um 0.3 Hz auf, deren Amplitude die der Sollschrwingungen wesentlich übersteigt (Abb. 7). Der nachteilende Phasenwinkel wächst wiederum an.

Bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 1.0 Hz erscheinen die Grund- und die 1. Oberwelle mit auffallender Amplitudenverkleinerung, während die 2. Oberwelle nur noch schwach angedeutet wird. Zahlreiche Frequenzneubildungen und eine erneute Zunahme des nachteilenden Phasenwinkels werden auch hier beobachtet.

Die Untersuchung über die zeitliche Verteilung der sakkadischen Korrekturbewegungen zeigt - ähnlich wie schon beim "einfachen" periodischen Muster - eine besondere Bevorzugung gewisser Sprungintervalle. Diese liegen beim "komplizierten" periodischen Muster mit einer Grundwellenfrequenz von 0.5 Hz bei 240 und 360 msec, verwischen sich jedoch sichtbar mit steigendem Geschwindigkeitsablauf des Vorgabesignals.

Ic) Vorgabe eines aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzten periodischen Musters.

Durch Mischung von fünf amplitudengleichen Sinusschwingungen, deren Frequenzen sich zueinander wie $1 : 2 : 3 : 4 : 5$ verhielten, entstand das periodische Muster dieser Versuchsreihe. Die Oberwellen wurden in ihren Anfangsphasen um 252° , 307° , 105° und 254° gegen die Grundwelle verschoben. Auch dieses Erregungsmuster (Abb. 8a) wurde mit Grundwellengeschwindigkeiten von 0.25, 0.5, 0.75 und 1.0 Hz untersucht. - Während eines jeden Versuches wurde der Versuchsperson zunächst über einen längeren Zeitraum das vollständige Muster dargestellt und dann - nach einer jeweils kurzen Pause - das Signal ohne die (2.) oder (4.) oder (2. und 4.) oder (3. und 5.) Schwingung vorgegeben.

Beide Versuchspersonen empfanden, daß der Kurvenverlauf bei fehlender (2. und 4.) Welle subjektiv leichter nachgebildet werden konnte, als wenn die (3. und 5.) Welle nicht in der Vorgabe enthalten waren.

Im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen fällt bei optischer Betrachtung der Folgekurven auf, daß das periodische Muster anscheinend wesentlich ungenauer als das "einfache" periodische oder das "komplizierte" periodische reproduziert wird; dem widersprechen jedoch z.T. die rechnerisch ermittelten Ergebnisse. Danach gibt die Vp. Hu. bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 0.25 Hz alle geforderten Frequenzen einwandfrei, aber mit verschiedenen Amplituden wieder, wobei deren

Höhen ziemlich gleichmäßig von der 1. bis zur 5. Schwingung ansteigen (Abb. 8b). Auch die Vp. Vo. trifft alle Frequenzanteile des Musters sicher, aber mit schwankenden, verkleinerten Amplituden. Mit Ausnahme weniger vereinzelter Beispiele zeigen alle nachgebildeten Frequenzen bei beiden Versuchspersonen einen deutlichen Phasennachhalt.

Bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 0.5 Hz scheint das Kurvenbild ebenfalls - rein visuell beurteilt - erheblich von dem Vorgabemuster abzuweichen, aber die Frequenzanalyse zeigt wiederum ein fast exaktes Einhalten aller geforderten Frequenzen. Nur in einem einzigen Ausnahmefall fehlt bei der Vp. Hu. die Grundwelle und an ihrer Stelle findet sich eine breitbasige Verschleifung, die ihr Maximum um 0.45 Hz erreicht. Alle Amplituden sind erheblich verkleinert und weisen einen stetigen Abfall ihrer Größe von der Grundwelle bis zur 4. Oberwelle auf. Der Phasennachhalt ist größer als bei den Versuchen mit 0.25 Hz und nimmt auch innerhalb des Musters von der 1. bis zur 5. Welle regelmäßig zu. Beim Abschalten einzelner Frequenzen findet sich gelegentlich ein Vorseilen der Phasenwinkel, ohne daß sich daraus allerdings eine Gesetzmäßigkeit ableiten ließe.

Mit weiterer Beschleunigung des Musters auf eine Grundwellengeschwindigkeit von 0.75 Hz gelingt beiden Versuchspersonen nur noch die Reproduktion der 1. und 2. Schwingung frequenzgetreu, doch mit sehr kleiner Amplitude. Daneben entsteht eine Vielzahl unregelmäßiger

neuer Frequenzen, deren ausgeprägteste und amplituden-
größte um 0.45 Hz liegt.

Bei Änderung des Vorgabemusters durch Abschalten bestimmter Frequenzanteile treten diese - im Gegensatz zu den Versuchen mit niedrigeren Grundwellengeschwindigkeiten - in der Folgekurve nicht mehr in Erscheinung; der nacheilende Phasenwinkel bleibt weiterhin erhalten.

Bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 1.0 Hz ergibt die mathematische Analyse, daß die 1. und 2. Schwingung noch andeutungsweise reproduziert werden, obwohl sich die Folgekurve augenscheinlich nur aus langsam ansteigenden, durch Sprünge unterbrochenen, Linien zusammensetzt. Im Hinblick auf Phasenwinkel und Frequenzneubildungen unterscheiden sich die Ergebnisse im Prinzip nicht wesentlich von denen der vorangegangenen Serie mit einer Muster-
geschwindigkeit von 0.75 Hz.

Auch für die Versuche mit einer periodischen Mischung von fünf harmonischen Schwingungen wurden Kistogramme über das Korrektursprungverhalten der Augenregelbewegung aufgestellt. Dabei bestätigten sich die früheren Beobachtungen, daß die am häufigsten gewählten Sprungintervalle bei einer Grundwellenfrequenz von 0.25 und 0.5 Hz etwa 240 msec betragen; bei steigender Geschwindigkeit des Musters verschleifen diese Maxima deutlich.

Id) Vorgabe eines aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzten nichtperiodischen Musters vom Typ A.

Für diese Versuchsreihe wurden fünf amplitudengleiche Sinusschwingungen mit Frequenzverhältnissen von 1.00 : 1.36 : 1.85 : 2.26 : 2.57 gemischt. Das daraus entstehende Muster, das sich erst nach einem Zeitraum von ca. 4 Stunden wiederholte und damit für die Versuchsperson praktisch nicht vorhersagbar war, wurde mit Geschwindigkeiten der langsamsten Frequenz von 0.25, 0.5, 0.75 und 1.0 Hz untersucht.

Genau wie beim periodischen Muster wurden auch hier während der Versuche kurzzeitig die (2.) oder (4.) oder (2. und 4.) oder (3. und 5.) Frequenz aus der Vorgabe herausgenommen. In abschließenden Kontrollversuchen wurden nur die drei langsamsten Schwingungen mit denselben Mustergeschwindigkeiten dargeboten.

Diese Versuchsreihe wurde nur von der Vp. Vo. durchgeführt.

Bei einer Geschwindigkeit der niedrigsten Frequenz von 0.25 Hz wird der Vorgabe - soweit sich das optisch beurteilen läßt - ohne große Abweichungen gefolgt. Die Leistungsspektren der Folgebewegung weisen im Bereich aller geforderten Frequenzen charakteristische - wenn auch zu niedrige - Amplitudenwerte auf. Daneben werden gleichzeitig in hohem Maße Zwischenfrequenzen neugebildet. Mit nur einer einzigen Ausnahme findet sich ein deutlicher Phasennachhalt, der für die einzelnen

Oberwellen erheblich schneller als in den bisher beschriebenen Versuchen anwächst.

Nach Abschalten der (4. und 5.) Frequenz ändert sich das optische Bild der Wiedergabe anscheinend nur unwesentlich, in den Leistungsspektren tritt jedoch eine sichtbare Verbesserung der Ergebnisse ein. Alle geforderten Frequenzen werden mit größeren Amplituden als beim vollständigen Muster eingehalten, die Zahl der neugebildeten Zwischenfrequenzen verringert sich erheblich und auch der Phasennachhalt nimmt ab.

Bei einer Geschwindigkeit der niedrigsten Frequenz von 0.5 Hz wirkt die Folgekurve noch immer vorbildgetreu, aber die Ergebnisse der mathematischen Analyse verschlechtern sich. Alle Frequenzen sind zwar in den Leistungsspektren enthalten, doch ihre Amplitudenwerte nehmen sichtbar ab. Gleichzeitig vergrößert sich der nachteilende Phasenwinkel.

Wie bereits beobachtet wurde, verbessert sich die Wiedergabe des Musters, wenn nur seine drei niedrigsten Frequenzanteile dargeboten werden. Alle geforderten Schwingungen treten deutlich als schmalbasige Spitzen im Sollfrequenzbereich auf. Von den relativ gut ausgeprägten Amplituden erreicht die der schnellsten Welle den größten Wert. Der Phasennachhalt verringert sich wiederum gegenüber der vollständigen Mustervorgabe. Der Kurvenverlauf wird bei weiterer Steigerung der Mustergeschwindigkeit auf 0.75 Hz augenscheinlich noch immer ausreichend reproduziert. Bei der Betrachtung der dazugehörigen Leistungsspektren fällt allerdings sofort

das stark variiierende Frequenzbild auf. Nicht alle geforderten Musteranteile werden vorgabegetreu wiedergegeben, wobei die höchste Frequenz erheblich besser und mit größerer Amplitude in Erscheinung tritt, als die anderen z.T. nur schwach angedeuteten Schwingungen. Die Zahl der Frequenzneubildungen nimmt zu, die Phasenbeziehungen werden unregelmäßig und schwanken stark zwischen vor- und nach-eilenden Phasenwinkeln.

Werden während des Versuches einzelne Frequenzen für kurze Zeit abgeschaltet, so entstehen zwar optisch verhältnismäßig gut erscheinende Nachbildungen des Vorgabemusters, aber auch hier zeigt die Frequenzanalyse, daß dieses Kurvenbild wesentlich schwieriger als die bisher untersuchten periodischen Muster wiederzugeben ist. Am sichersten und mit größter Amplitude wird wiederum die höchste Welle getroffen, während sehr kleine Amplituden, Frequenzverschiebungen der übrigen Musteranteile und zahlreiche Neubildungen die Genauigkeit der Folgekurve stark beeinträchtigen. Nach Angaben der Versuchsperson war das Muster ohne (2. und 4.) Frequenz angenehmer und leichter zu befolgen als mit abgeschalteter (3. und 5.) Frequenz. Diese Beobachtung findet in den rechnerischen Ergebnissen der Frequenz-, Amplituden- und Phasenbeziehungen ihre Bestätigung (Abb. 9a, 9b). Eine sichtbare Verbesserung der Nachbildungsfähigkeit tritt ein, wenn nur die drei niedrigsten Schwingungen des Musters vorgegeben werden. Aus der Vielzahl von Neubildungen heben sich die geforderten Frequenzen mit gut erkennbaren Amplituden im Leistungsspektrum ab.

Auch hier vermindert sich der Phasennachhalt geringfügig.

Bei einer Frequenz der langsamsten Schwingung von 1.0 Hz verliert sich die Übereinstimmung von Vorgabe und Folge fast vollständig. Alle Sollfrequenzen erscheinen als breitbasige Verschleifungen mit ver-schwindend kleinen Amplituden und unter den wenigen Frequenzneubildungen fällt ein in seiner Größe alle anderen Schwingungen erheblich übersteigendes Maximum um 0.6 Hz auf; die Phasenbeziehungen verwischen sich noch stärker als zuvor und verlieren jede bisher beobachtete Regelmäßigkeit. Beim Abschalten einzelner Frequenzanteile werden - in Übereinstimmung mit den vorangegangenen Mustergeschwindigkeiten - bestimmte Frequenzkombinationen besser als die übrigen befolgt und in allen Fällen wird die höchste im Muster enthaltene Schwingung besonders hervorgehoben.

Am vorgabegetreuesten wird die Erfassung des Kurvenverlaufes wiederum, wenn nur den drei langsamsten Schwingungen Folge zu leisten ist. Alle Musteranteile werden genauer und mit größeren Amplitudengipfeln nachgebildet, die Phasenbeziehungen bleiben allerdings nach wie vor unregelmäßig. Die in allen Versuchen mit einer Geschwindigkeit von 1.0 Hz aufgetretene Frequenzneubildung um 0.6 Hz beherrscht auch hier das Bild der Leistungsspektren.

Die Untersuchungen über das Korrektursprungverhalten des menschlichen Auges lassen in dieser Versuchsreihe keine eindeutigen Aussagen zu. Es fällt lediglich auf, daß der Kurvenverlauf der Histogramme mit Ansteigen der Mustergeschwindigkeit variabler und uncharakteristischer wird.

Ie) Vorgabe eines aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzten nichtperiodischen Musters vom Typ B.

Das nichtperiodische Erregungsmuster dieser Versuchsreihe entstand ebenfalls aus einer Mischung von fünf amplitudengleichen Sinusschwingungen. Im Gegensatz zum Muster vom Typ A der vorangegangenen Serie wurden ihre Frequenzverhältnisse mit $1.00 : 2.21 : 3.44 : 4.77 : 6.20$ in erheblich größerem Abstand gewählt. Das daraus resultierende Kurvenbild gilt als nichtperiodisch und unvorhersagbar (Abb. 10).

Auch in diesen Versuchen wurden die (2.) oder (4.) oder (2. und 4.) oder (3. und 5.) Frequenz abgeschaltet und abschließend nur die drei langsamsten Schwingungen des Musters dargeboten. Die Untersuchung der Kurven erfolgte in der üblichen Weise mit Geschwindigkeiten der niedrigsten Frequenz von 0.25, 0.5, 0.75 und 1.0 Hz.

Bei einer Mustergeschwindigkeit von 0.25 Hz ist der optische Eindruck der Wiedergabe recht gut, und die dazugehörigen Leistungsspektren zeigen - mit nur einer Ausnahme bei der Vp. Hu. - ein relativ sicheres Einhalten der geforderten Schwingungen und eine nur geringe Anzahl neuer Frequenzbildungen. Allerdings weichen die Fähigkeiten der beiden Versuchspersonen zur Mustererfassung und Nachbildung mehr als bisher voneinander ab. Während die Vp. Hu. alle Frequenzen genau und annähernd gleich groß reproduziert, nehmen bei der Vp. Vo. die Amplitudenhöhen der z.T. geringfügig von den Soll-

werten abweichenden Musteranteile stetig von der niedrigsten zur höchsten Schwingung ab. Der Phasennachhalt ist im allgemeinen bei der Vp. Vo. stärker ausgeprägt als bei der Vp. Hu. und wächst bei beiden Versuchspersonen in den höheren Frequenzanteilen des Musters gleichmäßig an.

Werden als Vorgabe nur die drei langsamsten Schwingungen des Erregungsmusters gewählt, so verbessern sich die Frequenz-, Amplituden- und Phasenbeziehungen in der gleichen auffallenden Weise wie beim nichtperiodischen Muster vom Typ A.

Bei einer Steigerung der Mustergeschwindigkeit auf 0.5 Hz weicht der Verlauf der Folgekurve erheblich von dem der Vorgabe ab und alle Leistungsspektren zeigen übereinstimmend für beide Versuchspersonen, daß - auch beim Wegschalten der (2.) oder (4.) oder (2. und 4.) oder (3. und 5.) Welle - nur die niedrigste Schwingung ziemlich frequenzgetreu und mit ausreichend großer Amplitude wiedergegeben wird, während die anderen Sollfrequenzen weitestgehend fehlen und dafür eine Vielzahl von Neubildungen auftritt. In den Phasenbeziehungen der erhalten gebliebenen Frequenz beginnen sich z.T. geringe Unregelmäßigkeiten in Form von ganz leicht vor- oder sehr stark nacheilenden Phasenwinkeln abzuzeichnen.

Die bisherigen Beobachtungen, daß das Vorgabesignal wesentlich genauer reproduziert wird, wenn nur seine drei niedrigsten Frequenzanteile vorgegeben werden, treffen auch für diese Mustergeschwindigkeit zu. Die geforderten

Schwingungen erscheinen wieder in den Leistungsspektren mit erkennbaren, sich in den höherfrequenten Musteranteilen vermindern den Amplitudenwerten. Die Phasenbeziehungen werden einheitlicher als bei Vorgabe des Gesamt-musters und weisen einen geringen, in den höheren Frequenzanteilen des Musters anwachsenden Phasennachhalt auf.

Unabhängig davon, ob nur drei oder alle fünf Frequenzen dargeboten werden, verliert das optische Bild der Folgekurve fast völlig den Zusammenhang mit der Vorgabe, wenn die Mustergeschwindigkeit auf 0.75 Hz und 1.0 Hz erhöht wird. Auch in den Leistungsspektren hebt sich nur noch vereinzelt die niedrigste Welle mit sehr kleiner Amplitude aus dem sehr variablen Frequenzbild ab, andere Musteranteile werden nicht mehr erfaßt. Gleichzeitig erlischt jede Regelmäßigkeit in den Phasenbeziehungen und die Phasenwinkel streuen zwischen starkem Vor- und Nacheilen.

Die sakkadischen Korrektursprünge scheinen auch in dieser Versuchsserie keinen festen Gesetzmäßigkeiten zu unterliegen. Nur bei einer Mustergeschwindigkeit von 0.25 Hz für die niedrigste Frequenz wird ein zeitlicher Abstand von ca. 240 msec zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sprüngen deutlich bevorzugt; bei höheren Mustergeschwindigkeiten ergibt sich jedoch keine besondere Häufung eines bestimmten Zeitintervalles (Abb 11a, 11b).

II) Versuche mit getastet dargebotenen Reizmustern.

Alle bisher beschriebenen Versuche wurden direkt nach ihrer Beendigung oder nach Ablauf einer Pause von maximal einer Stunde unter den gleichen Bedingungen, aber mit getastet dargebotenem Erregungsmuster, wiederholt. Nach anfänglich kontinuierlicher Vorgabe des Signals wurde der Kurvenverlauf später mit sprungförmig veränderten Tastfrequenzen von 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0 und 12.0 Hz untersucht.

Außerdem wurden auch bei den nichtperiodischen Mustern vom Typ A und Typ B abschließend nur die drei langsamsten Schwingungen vorgegeben und mit denselben Frequenzen abgetastet.

Alle Versuche dieser Serie wurden von zwei Versuchspersonen durchgeführt und die Ergebnisse optisch ausgewertet. Infolge der bereits oben erwähnten Gründe konnte nur eine Auswahl der qualifiziertesten Kurvenabschnitte einer mathematischen Analyse unterzogen werden.

Aus diesen Untersuchungen ergab sich ein weit weniger einheitliches Bild als bei gleichem, aber ungetastet dargebotenem Musterverlauf. Einzeln gesehen erlauben die Versuche durch ihre große Variabilität keine genauen Aussagen. Trotzdem zeichnen sich aber bei Betrachtung aller Ergebnisse gewisse allgemeine Prinzipien ab. Bereits ab einem Verhältnis der Vorgabe zur Tastung von 1 : 2 (bezogen auf die Geschwindigkeit der Grundwelle) wird bei allen untersuchten Geschwindigkeiten die niedrigste Schwingung des "einfachen" periodischen und des

"komplizierten" periodischen Erregungsmusters mit gut ausgeprägter Amplitude und z.T. sogar vorauseilendem Phasenwinkel nachgebildet, obwohl die Folgebewegungen bei rein optischer Sichtung keinerlei Ähnlichkeit zu den vorgegebenen Kurvenbildern erkennen lassen.

Zum Beispiel erscheint in einem Versuch der Vp. Vo. mit "einfachem" periodischen Muster bei einer Geschwindigkeit der niedrigsten Frequenz von 0.5 Hz die langsamste Welle erstmalig bei einer Abtasthäufigkeit von 1.0 Hz mit ausreichender Amplitude und ganz geringfügig vorauseilendem Phasenwinkel, ohne daß andere geforderte Musteranteile aus dem diffusen Bild des Leistungsspektrums hervortreten.

Mit zunehmender Kompliziertheit des Musterverlaufes steigt auch das zur Wiedergabe der langsamsten Schwingung erforderliche Abtastverhältnis an. Die Vp. Hu. reproduziert zwar auch vereinzelt den niedrigsten Frequenzanteil des periodischen Musters bei einem Tastverhältnis von 1 : 2 (Vorgabe : Tastung) in Versuchen mit Mustergeschwindigkeiten von 0.25 und 0.75 Hz, allgemein sind dazu aber bereits ca. vier Tastpunkte pro Schwingung erforderlich.

In einem Versuch mit Vorgabe der drei geringsten Frequenzen des nichtperiodischen Musters vom Typ A ist bei einer Mustergeschwindigkeit von 0.5 Hz dafür sogar die 12fache Tastfrequenz notwendig.

Im Verlauf der mathematischen Auswertung der Versuche mit periodischem Erregungsmuster fiel mehrfach auf, daß nach Erreichung höherer Tastfrequenzen neben der

langsamsten Schwingung auch die 2. Frequenz, mit sogar nennenswert größerer Amplitude, in Erscheinung tritt. Bei weiterer Zunahme der Abtasthäufigkeit geht diese partielle Befolgung des Musters entweder wieder verloren, oder die übrigen geforderten Frequenzanteile werden in zunehmendem Maße als flache Spektrallinien reproduziert. In den Phasenbeziehungen zeigen sich jedoch trotz der scheinbaren Übereinstimmung von Vorgabe und Folgekurve erhebliche Unregelmäßigkeiten in Form von stark vor- und nacheilenden Phasenwinkeln. Eine annähernd richtige Wiedergabe des Musters erfolgt aber erst, wenn auch die höchste in ihm enthaltene Schwingung mit mehr als dem Doppelten ihrer eigenen Frequenz abgetastet wird.

Dieses zur Erkennung des Kurvenverlaufes notwendige Abtastverhältnis stellt keinen konstanten Wert dar, sondern scheint von der Form und Geschwindigkeit des Musters abhängig zu sein.

Die Vp. Hu. befolgt beispielsweise bei Vorgabe des periodischen Erregungsmusters mit einer Geschwindigkeit der langsamsten Frequenz von 0.25 Hz bereits bei einer Tastfrequenz von 0.5 Hz die niedrigste Schwingung recht gut (Abb. 12a). Nach Erhöhung der Tastung auf 1.0 Hz stellt sich auch die 2. Frequenz ein. Das bei einer Abtasthäufigkeit von 1.5 Hz aufgestellte Leistungsspektrum enthält die 1. und 4. Schwingung mit ausreichend großer, die 2. Schwingung mit noch besser ausgeprägter Amplitude und außerdem eine Vielzahl kleiner Nebenfrequenzen. Während bei einer Tastfrequenz von

2.0 Hz das Bild der Folgekurve wieder erheblich mehr von der Vorgabe abweicht, werden bei einer Tastung von 3.0 Hz vorübergehend alle fünf geforderten Musteranteile frequenzgetreu, aber mit deutlichen Unregelmäßigkeiten in den Phasenbeziehungen getroffen (Abb. 12b). Nach neuerlicher Verschlechterung der Folge bei einer Tastung von 6.0 Hz (Abb. 12c) werden schließlich bei einer Abtasthäufigkeit von 12.0 Hz alle Frequenzen des Musters dem Vorbild entsprechend und mit einem regelmäßigen Phasennachhalt wiedergegeben (Abb. 12d). Bei dieser Tastfrequenz wird die niedrigste im Muster enthaltene Schwingung mit 48, die höchste noch immer mit 9.6 Tastpunkten pro Schwingung erfaßt.

Mit weiterem Ansteigen der langsamsten Welle der Mustervorgabe wird seine Nachbildung immer schwieriger, so daß bei einer Geschwindigkeit von 0.75 Hz nur noch entfernte, bei 1.0 Hz keine Ähnlichkeit mehr mit dem dargebotenen Signal besteht.

Bei nichtperiodischem Verlauf der Vorgabe wird die niedrigste Schwingung allgemein erst ab einem Tastverhältnis von 1 : 4 befolgt. Mit zunehmender Abtasthäufigkeit stellen sich jedoch nicht - wie erwartet - allmählich die nächsthöheren Frequenzanteile des Musters ein, sobald sie mit einer ausreichenden Zahl von Tastpunkten erfaßt werden, sondern vielfach geht sogar die Wiedergabe der einzigen bisher reproduzierten Schwingung wieder verloren. Mit weiterem Ansteigen der Tastfrequenz entsteht zunächst ein unregelmäßiges, mit der Vorgabe in keiner Weise übereinstimmendes Frequenzbild, bis schließlich

das vollständige Spektrum in Erscheinung tritt, wenn auch die höchste im Muster enthaltene Schwingung mit dem ca. 8 bis 10fachen ihrer eigenen Frequenz abgetastet wird. Besonders auffallend an diesen Versuchen ist die Tatsache, daß das Signal nur bei Mustergeschwindigkeiten von 0.25 und 0.5 Hz annähernd vorgabegetreu reproduziert werden kann, während bei 0.75 und 1.0 Hz der Verlauf des Musters, auch bei höchster Tastung, nicht mehr erkannt wird.

Vereinzelte Ausnahmen zeigen, daß bisweilen bei geringer Abtasthäufigkeit in den Leistungsspektren hohe Frequenzanteile des Musters vorhanden sind, obwohl das Tastverhältnis zu ihrer Erfassung nach den bisherigen Feststellungen keineswegs ausreichen kann. So tritt z.B. bei Vorgabe des periodischen Musters mit einer Geschwindigkeit der niedrigsten Schwingung von 0.25 Hz und einer Tastung von 1.5 Hz in der Frequenzanalyse der Vp. Hu. neben der 2. auch die 4. Schwingung als deutliches Amplitudenmaximum auf, das aber sofort mit neuerlicher Zunahme der Tastfrequenz wieder verschwindet.

Noch auffallender ist in diesem Zusammenhang ein Versuch der Vp. Vo. mit "kompliziertem" periodischem Kurvenverlauf. Bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 0.5 Hz und einer Tastfrequenz von 1.0 Hz wird die erwartete Grundwelle, darüber hinaus aber auch die 3. Oberwelle - allerdings mit kleinerer Amplitude - vorübergehend wiedergegeben. Alle Frequenzen des Musters stellen sich erstmalig bei einer Abtasthäufigkeit von

6.0 Hz mit stark streuenden und erheblich nacheilenden Phasenwinkeln ein. Eine endgültig sichere Folge mit nur wenigen Nebenfrequenzen und annähernd einheitlichem, geringfügigem Phasennachhalt ergibt sich aber erst bei einer Tastfrequenz von 12.0 Hz. Dabei wird die niedrigste Frequenz des Musters mit 24, die höchste mit 8 Punkten pro Schwingung abgetastet.

Ganz allgemein ist noch darauf hinzuweisen, daß übereinstimmend für alle Versuche mit getastet und ungetastet dargebotenen Reizmustern beide Versuchspersonen nach längerer Versuchsdauer in ihrer Konzentrationsfähigkeit stark nachlassen. Vorangegangene geistige oder anstrengende körperliche Arbeit wirken sich ebenso negativ auf die Ergebnisse aus: Nach anfänglicher Zunahme der Korrektursprünge geht die Folge des Auges - von der Versuchsperson unbemerkt - in eine langsame, kontinuierliche und unregelmäßige Bewegung über, deren Verlauf schließlich völlig unabhängig von der Vorgabe erfolgt. Durch kurzen Anruf aufmerksam gemacht, reproduziert die Versuchsperson das Muster für einige Zeit vorbildgetreuer, um später erneut in träge Augenbewegungen zu verfallen (Abb. 13a, 13b).

D i s k u s s i o n .

Das System des willkürlichen Bewegungsablaufes beim Menschen wurde bisher vorwiegend für die beiden am leichtesten erfaßbaren Modelle der gezielten Hand- und der gezielten Augenbewegung untersucht. Man gelangte zu der Überzeugung, daß beiden Systemen ein annähernd gleicher formaler Aufbau zugrunde liegen müsse, wobei dem Auge eine Führungsrolle über die Hand zuzuschreiben ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das System der Augenregelbewegung nach eingehender Untersuchung mit dem der Handregelbewegung (Vossius (22), (23), Hummel (4) und Wezel (25)) verglichen.

Die Beurteilung der Ergebnisse basiert vorwiegend auf der mathematischen Analyse der Frequenz-, Amplituden- und Phasenbeziehungen der vorgegebenen und reproduzierten Muster, da die rein optische Betrachtung des Kurvenmaterials keine ausreichend gesicherten Folgerungen zuläßt. Obwohl weit mehr als 120 000 Einzelwerte - also über 50 % mehr als in den vorangegangenen Arbeiten von Hummel (4) und Wezel (25) zusammen - abgelesen wurden, ist die erwünschte eindeutige Aussage nicht möglich, da einerseits wegen des höheren Frequenzumfanges der sakkadischen Augenbewegung die Anzahl der zu erfassen- den Punkte pro Schwingung gegenüber der Handbewegung wesentlich erhöht werden mußte, und da andererseits die gefundenen Ergebnisse eine größere Variabilität aufweisen.

Deshalb erlauben die rechnerisch ermittelten Werte allgemeine Schlüsse über den Aufbau und die Wirkungsweise des Augenregelkreises, die jedoch mit den vorhandenen Mitteln vorläufig nicht statistisch gesichert werden können. Trotzdem sind schon jetzt bei Betrachtung der z.T. erheblich voneinander abweichenden Verhaltensweise beider Systeme deutliche Unterschiede ihrer Konstruktionsmerkmale festzustellen.

Während bei der Handfolgebewegung das getrennte Wirken von Tast- und kontinuierlichem Filter nur durch besondere Versuchsbedingungen (Vossius und Choudhry (16), Altrock (1)) dargestellt werden konnte, tritt die korrigierende Eigenschaft des Tastfilters bei der Augenregelbewegung in Form der sakkadischen Korrektursprünge offen in Erscheinung. Die immer wieder bevorzugten Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sprüngen lassen darauf schließen, daß das Tastfilter diskontinuierlich in Abständen von vorwiegend 240 - 360 msec die vom kontinuierlichen Anteil des Systems bewirkte Einstellung kontrolliert und Abweichungen vom Sollwert durch neuerliche Stellimpulse ausgleicht. Teilweise erfolgt diese Korrektur des Ortswertes anscheinend aber auch periodisch für jede Schwingung an einer besonders charakteristischen Stelle des Kurvenbildes, wie z.B. beim "einfachen" periodischen Muster durch die sehr ausgeprägte, im Grundwellenrhythmus verlaufende Zacke, deren dehnende Sprünge eine Berichtigung der Augenbewegung vornehmen und den Anschluß an den nur teilweise richtig wiedergehenden Kurvenverlauf wiederherstellen.

In seiner Wirkungsweise weicht der kontinuierliche Anteil im System der Augenregelbewegung deutlich von den für die Handbewegung gefundenen Gesetzmäßigkeiten ab. Das zeigt sich besonders darin, daß der Frequenzgang beim Auge bereits bei etwa 3.0 Hz seine Grenze erreicht, während die menschliche Hand sinusförmige Schwingungen bis zu einer Frequenz von 10 Hz auszuführen vermag.

Auffallend ist auch, daß selbst bei niedriger Mustergeschwindigkeit eine unzureichende Nachbildung des gesamten Kurvenbildes erfolgt, wenn der Frequenzabstand der zum Erregungsmuster zusammengefaßten Einzelschwingungen größer gewählt wird. Ist dagegen der Frequenzumfang der Vorgabe durch enge Lage der Schwingungen nicht sehr groß, so werden auch bis zu höheren Mustergeschwindigkeiten die Frequenzanteile vollständig wiedergegeben. Obwohl alle Einzelfrequenzen im Vorgabemuster mit gleicher Amplitudengröße enthalten sind, bewirken sie durch ihre gegenseitigen Phasenbeziehungen verschieden auffällige Formcharakteristika im Gesamtkurvenverlauf. Dadurch wird die Erkennungs- und Wiedergabemöglichkeit scheinbar erheblich beeinflusst, denn bei allen untersuchten Kurventypen, besonders aber bei periodischem und nichtperiodischem Musterverlauf, wurde immer wieder beobachtet, daß die zufällig am geringsten in Erscheinung tretende Schwingung in der Musterausgabe unterdrückt wird und im Leistungsspektrum der Folge nicht mehr enthalten ist.

Die Verschiedenheit im Verarbeitungsmodus beider Systeme offenbart sich auch bei Betrachtung der Phasenbe-

ziehungen. Während sich der anfangs große Phasennachhalt bei Vorgabe von einfachen Sinusschwingungen in der Handfolgebewegung rasch verringert und teilweise sogar in einen Phasenvorhalt übergeht, bleibt der einmal eingestellte Phasenwinkel beim Auge in der Regel auch nach längerer Versuchsdauer fast unverändert erhalten. Außerdem wird die Folgekurve der Augenbewegung nicht nur in ihrer Gesamtheit in einem bestimmten Winkel gegen die Vorgabe verschoben, sondern es treten zusätzlich innerhalb des Musters - für jeden Kurventyp individuell verschieden - Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Schwingungen auf, wobei die höheren Frequenzanteile stets einen größeren Phasennachhalt als die niedrigeren aufweisen.

Mit steigender Geschwindigkeit der Vorgabe - besonders auffallend bei nichtperiodischem Kurvenverlauf - nimmt der Phasennachhalt innerhalb des Musters für alle Frequenzanteile, deren Geschwindigkeit kleiner als 1 Hz ist, in der eben beschriebenen Weise stetig zu. Alle Einzelschwingungen, die über dieser Grenze von 1 Hz liegen, werden aber mit regellos um 0° und 360° wechselnden Phasenwinkeln wiedergegeben (Tabelle 1). - Die Annahme, daß das System seine Phasencharakteristik mit Erreichung dieser Frequenzgrenze plötzlich einschneidend ändert, ist nicht sehr wahrscheinlich, da die Wiedergabe des periodischen Musters mit gleich hohen Frequenzanteilen diesen so prägnanten Phasenabbruch nicht immer erkennen läßt. Es erscheint vielmehr sinnvoll, den Grund dieses Phänomens darin zu suchen, daß die

Nachbildung des Musters bei höheren Geschwindigkeiten statistisch schwankt, und die Phasenbeziehungen dadurch nicht mehr eindeutig definiert werden können.

Alle Ergebnisse deuten darauf hin, daß der kontinuierliche Teil der höheren opto-motorischen Zentren beim Auge kein einfaches passives System mit festen Übertragungseigenschaften darstellt. Da sich auch die Form des Kurvenbildes - das "einfache", das "komplizierte" und das periodische Muster werden besser befolgt als das nichtperiodische - und die Geschwindigkeit, mit der es vorgegeben wird, als weitere wichtige Kriterien für die Möglichkeit zur Mustererfassung erwiesen haben, könnte dieses Verhalten - in Analogie zur Handbewegung - im Sinne einer Adaptationseigenschaft interpretiert werden.

Diese Annahme muß allerdings nach den Ergebnissen aller in der vorliegenden Arbeit untersuchten Erregungsmuster negiert werden, denn es hat sich gezeigt, daß auch bei mehrfacher Wiederholung des Versuches mit gleicher Frequenzmischung keine Änderung oder Verbesserung in der Reproduktion des vorgegebenen Signals festgestellt werden konnte. Im Gegensatz zur Handfolgebewegung findet auch nach längerer Versuchsdauer keine sichtbare Anpassung der Parameter der Folge statt, wie vergleichsweise ausgewertete Kurvenabschnitte am Anfang und am Ende derselben Versuche beweisen.

Die Tatsache, daß vielfach nur ein Teil der geforderten Schwingungen wiedergegeben wird und daß gleichzeitig zahlreiche unregelmäßig neugebildete Nebenfrequenzen in

den Leistungsspektren der Folgekurven auftreten, gibt Anlaß zu der Vermutung, daß die höheren Zentren im System der Augenregelbewegung - ähnlich wie bei der Willkürbewegung der Hand - vorgegebene Muster nicht nach ihrem Frequenzinhalt, sondern nach dem Weg-Zeitverlauf analysieren.

Die für die Hand beobachtete Fähigkeit der langzeitigen Mustervorhersage scheint bei der Augenregelbewegung nicht in dieser Form vorhanden zu sein, wie die sich während eines jeden Versuches nicht verbessernde Folgequalität und die fast ausnahmslos nachteiligen Phasenwinkel andeuten. Aus der wesentlich genaueren und in den Phasenbeziehungen einheitlicheren Befolgung der "einfachen", "komplizierten" und periodischen - also in ihrem Ablauf deterministisch festgelegten - Muster gegenüber den nichtperiodischen und damit unvorhersagbaren Signalen läßt sich aber auf eine sehr schnelle, die Form des Kurvenbildes kurzzeitig erfassende Predictionseigenschaft schließen. Dieser Vorgang wird wiederum durch die Geschwindigkeit, mit der das Signal dargeboten wird, insofern beeinflusst, als bei sehr raschem Bewegungsablauf der Vorhersagemechanismus zwar angestoßen wird, aber aus bisher unbekannten Gründen zu Fehlbeurteilungen der Vorgabe führt. Am ausgeprägtesten zeigt sich diese Erscheinung bei Grundwellengeschwindigkeiten von 0.75 und 1.0 Hz im "komplizierten" periodischen Muster, dessen Form einer großen Sinusschwingung mit einer anschließend etwas weniger hoch ansteigenden und langsam modulierend abfallenden Welle

entspricht. Während das langsam dargebotene Kurvenbild vorgabegetreu wiedergegeben wird, nimmt die Folge bei hohen Mustergeschwindigkeiten die Gestalt dicht aufeinanderfolgender sinusartiger Schwingungen an. Offensichtlich schließt das System aus dem kurzzeitigen Verweilen in der Abwärtsbewegung des Signals auf eine bevorstehende Richtungsänderung und führt diesen erwarteten Wiederanstieg des Kurvenverlaufes fälschlicherweise aus. Dadurch entsteht eine zeitliche Differenz bis zum Beginn einer neuen Musterperiode, die mit korrigierenden Einstellbewegungen ausgeglichen wird (Abb. 14).

Alle Anzeichen sprechen dafür, daß - im Gegensatz zur Folgebewegung der Hand - im kontinuierlichen Zweig des Systems der Augenbewegung eine Musterspeicherung wahrscheinlich nicht stattfindet, zumindest aber nicht über einen längeren Zeitraum nachweisbar anhält. So erklären sich die Versuche, in denen das Auge nach Abschalten der Vorgabe, außer einer abklingenden Folge, keine kontinuierliche Bewegung mehr auszuführen vermag, während die Hand auch unter dieser Voraussetzung das Muster noch durchaus zusammenhängend reproduziert. ,

Auf Grund neuerer Versuche mit dreieckförmigem Signal ergeben sich allerdings Zweifel, ob dem kontinuierlichen Anteil des Augenregelsystems nicht doch ein sehr langsam arbeitendes Gedächtnis zugeordnet werden kann. In einem noch nicht genau begrenzten Frequenzbereich verringert sich nämlich bei Vorgabe dieses Mustertypes der anfängliche Phasennachhalt im Laufe des Versuches mehr und mehr und geht schließlich in einen Phasenvorhalt über. Nach

dem bisherigen Stand der Untersuchungen läßt sich also noch nicht mit Sicherheit entscheiden, inwieweit dem kontinuierlichen Systemanteil möglicherweise eine bei besonderen Musterformen auftretende Lernfähigkeit zugeschrieben werden kann.

Dagegen hat sich erwiesen, daß der diskontinuierlich arbeitende Teil neben seiner Funktion als Korrektursystem Möglichkeiten zur Lernfähigkeit und Gedächtnisbildung besitzt. So zeigten Versuche von Stark, Vossius und Young (12) mit einer periodischen Rechteckwelle als Vorgabemuster zunächst einen starken Phasennachhalt der sprunghaft ablaufenden Folgebewegung, der sich nach längerer Versuchsdauer in einen sichtbaren Phasenvorhalt umwandelte.

Das Vorhandensein eines Lerneffektes im sakkadischen System wird auch durch Beobachtungen dieser Arbeit bestätigt, daß besonders ausgeprägte Formcharakteristika im Kurvenverlauf mit sich periodisch wiederholenden Korrektursprüngen beantwortet werden.

Bei getasteter Mustervorgabe fällt auf, daß zwar fast immer bei einem Tastverhältnis der Vorgabe zur Folge von 1 : 2 die 1. Welle und bei 1 : 4 die 2. Welle in Erscheinung tritt, daß aber dann mit einer weiteren Erhöhung der Tastung bis zu einer für die nächsthöheren Schwingungen als ausreichend erwarteten Abtasthäufigkeit oft keine Wiedergabe dieser geforderten Frequenzanteile des Musters erfolgt.

Die Möglichkeit der Nachbildung eines getastet dargebotenen Musters scheint damit nicht in erster Linie

vom Tastverhältnis, mit dem die einzelnen Schwingungen erfaßt werden, sondern vorwiegend von der Kompliziertheit der Form und der Geschwindigkeit des Musterverlaufs abhängig zu sein. Am sichersten und schon mit relativ geringer Abtasthäufigkeit wird eine reine Sinusschwingung wiedergegeben, während mit zunehmender Schwierigkeit auch die zur Musterreproduktion erforderliche Tastfrequenz vom "einfachen" über das "komplizierte", das periodische zum nichtperiodischen Erregungsmuster ständig anwächst.

Diese zur Erfassung der verschiedenen Vorgabesignale gerade genügenden Tastverhältnisse lassen sich nicht mit absoluter Sicherheit bestimmen. Es hat sich jedoch ergeben, daß zur Erzielung einer vorgabegetreuen Folgebewegung die theoretische Grenze von mindestens zwei Tastpunkten pro Schwingung der höchsten im Muster enthaltenen Frequenz überschritten werden muß, wobei sich die richtige Phasenlage der einzelnen Wellen erst bei noch wesentlich höheren Tastfrequenzen als der amplitudenmäßige Ablauf der Kurve einstellt.

Bei unzureichender Tastung oder zu kompliziertem Musterverlauf beschränkt sich das Zentralnervensystem vorwiegend auf die Wiedergabe der eindeutig erkannten Musteranteile. Dabei treten zwangsläufig auch gewisse Frequenzneubildungen auf.

Nach der aus den vorliegenden Untersuchungen gewonnenen Modellvorstellung bauen sich die höheren Zentren im System der Augenregelbewegung aus einem kontinuierlichen und einem diskontinuierlichen Anteil auf. Der

kontinuierliche Teil erfaßt den augenblicklichen Weg-Zeitverlauf des Musters, also seine Form, und wirkt im Sinne eines kurzzeitigen Vorhersagemechanismus, ohne aber eine ausgeprägte Adaptationseigenschaft oder Lernfähigkeit zu entwickeln. Der diskontinuierliche Teil des Systems dient vorwiegend der Kontrolle und Korrektur der momentanen Augeneinstellung. Er ist u.a. von einem Gedächtnis gesteuert und kann damit periodisch wiederkehrende Ereignisse sinnvoll anticipieren. Bei getasteter Mustervorgabe scheint jedoch keine Synchronisation des diskontinuierlichen Filters mit den Tastpunkten des vorgegebenen Signals zu erfolgen.

Das Augenregelsystem unterscheidet sich in seinem Verhalten durchaus von dem der gezielten Handbewegung, die zu einem wesentlichen Teil auf der gedächtnismäßigen Erfassung und Reproduktion systematischer Anteile des Vorgabemusters basiert und sich damit immer mehr von dem Vorgang der Regelung entfernt und quasi zu einer Art Programmsteuerung wird.

Die Augenbewegung ist dagegen mit ihrem kontinuierlichen Systemanteil wesentlich enger als die Willkürbewegung der Hand an die augenblickliche Ortsveränderung des betrachteten Zielobjektes gebunden und damit also von dem gegenwärtig in der Umwelt ablaufenden Vorgang unmittelbar abhängig. Ihr sakkadischer Zweig nimmt die Aufgabe der Kontrolle über die vom kontinuierlichen Anteil veranlaßte Einstellbewegung wahr und bewirkt die Korrektur eventueller Abweichungen vom Sollwert. Er kann zusätzlich von einem Gedächtnis gesteuert werden und ist

damit mehr als das kontinuierliche Filter von der engen Bindung an die direkte Beobachtung gelöst.

Als abschließendes Ergebnis der Untersuchungen läßt sich feststellen, daß das System der Augenregelbewegung in seiner Gliederung dem System der Regelbewegung der Hand ähnelt, in seinem Verarbeitungsmodus jedoch eigenen Gesetzmäßigkeiten unterliegt.

Z u s a m m e n f a s s u n g .

Das System der Augenregelbewegung wurde in Analogie zu den jüngst von Vossius (22), Hummel (4) und Wezel (25) durchgeführten Versuchen zur weiteren Klärung seiner Systemstruktur mit komplizierten getastet und ungetastet dargebotenen Vorgabesignalen untersucht. Als periodische und nichtperiodische Erregungsmuster dienten Mischungen mehrerer amplitudengleicher Sinusschwingungen, die mit Geschwindigkeiten von 0.25, 0.5, 0.75 und 1.0 Hz der niedrigsten im Muster enthaltenen Frequenz dargeboten wurden.

Nach den vorliegenden Ergebnissen analysieren die höheren opto-motorischen Zentren das Erregungsmuster nicht nach seinem Frequenzinhalt, sondern versuchen es in seinem Weg-Zeitverlauf zu erfassen. Dabei entwickeln sie die Möglichkeit einer kurzzeitigen Muster vorhersage, ohne daß eine nennenswerte Gedächtnisbildung oder Adaption des Systems nachweisbar wäre; allerdings sprechen einzelne Anzeichen für eine begrenzte Lernfähigkeit.

Auch einer getasteten Mustervorgabe wird mit kontinuierlichem Bewegungsablauf gefolgt. Dabei werden in der Regel nur die Frequenzanteile wiedergegeben, die auf Grund einer ausreichenden Tastung sicher erkannt werden. Zur vorgabegetreuen Reproduktion des Gesamtmusters muß auch die höchste in ihm enthaltene Frequenz im allgemeinen mit wesentlich mehr als zwei Punkten pro Schwingung abgetastet werden.

Das System der Augenregelbewegung weist demnach eine gewisse Ähnlichkeit mit dem nicht lernfähigen Verarbeitungszweig im System der Willkürbewegung der Hand auf. Die Ergebnisse und ihre Folgerungen werden im einzelnen diskutiert.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s .

1. Altrock, W. : Inaug.-Diss., Frankfurt /M., 1961
2. Drischel, H. : Pflügers Arch. Physiol. 268, 34 (1958)
3. Fischer, E.P. : Kurzes Handbuch der Ophtalmologie
Bd 3, S. 450, Berlin 1930
4. Hummel, J.C. : Inaug.-Diss., Frankfurt /M., 1964
5. Küpfmüller, K. und
G.Poklekowski : Z. Naturforsch. 11b, 1 (1956)
6. Mayne, R. : Electr. Engng. 70, 207 (1961)
7. Oppelt, W. : Kleines Handbuch technischer Rege-
lungsvorgänge, Weinheim 1956
8. Rashbass, C. : J. Physiol. 159, 326 (1961)
9. Richter, H.R. und
C.R.Pfaltz : Confinia Neurologica, Vol. 16 No. 415
(1956)
10. Schäfer, O. : Grundlagen der selbständigen Rege-
lung, München 1957
11. Stark, L. und
A.Sandberg : Quarterly Progress Report,
Massachusetts Institute of
Technology, Nr. 62, 268 (1961)
12. Stark, L.,
Vossius,G. und
L.R.Young : Ire Trans P.G. H.F.E., H.F.E. - 3,
52, (1962)
13. Sünderhauf, A. : Klin. Monatsblätter f. Augenheil-
kunde 136, 837 (1960)
14. Trincker, D.,
Sieber, J. und
J.Bartual : Kybernetik I 1, 21 (1961)
15. Vossius, G. : Akademie der Wiss. und Lit. 4, 107
(1957)
16. Vossius, G. und
A.S.Choudhry : Pflügers Arch. 268, 75 (1958)
17. Vossius, G. : Z. Biol. 112, 27 (1960)
18. Vossius, G. : VII Internationale Konferenz der
Vereinigung f. das Studium bio-
logischer Rhythmen, Estratto dal
Volume degli "Atti", Edizio in
Panminerva Medica, Mailand 1960
19. Vossius, G. : Naturwiss.Rundschau 13, 465 (1960)
20. Vossius, G. : Kybernetik 1, 28 (1961)
21. Vossius, G. : Die Regelbewegung des Auges, in Aufn.
und Verarbeitung von Nachr. durch
Organismen, S. 149 (1961)

22. Vossius, G. : Habilitationsschrift Med. Fakultät,
Univ. Frankfurt /M. 1962
23. Vossius, G. : Die Vorhersageeigenschaft des Systems
der Willkürbewegung in "Neuere Er-
gebnisse der Kybernetik" S. 196
München 1964
24. Westheimer, G. : A.M.A. Arch. Ophth. 52, 655 und 932
(1954)
25. Wezel, F. : Inaug.-Diss., Frankfurt /M. 1962

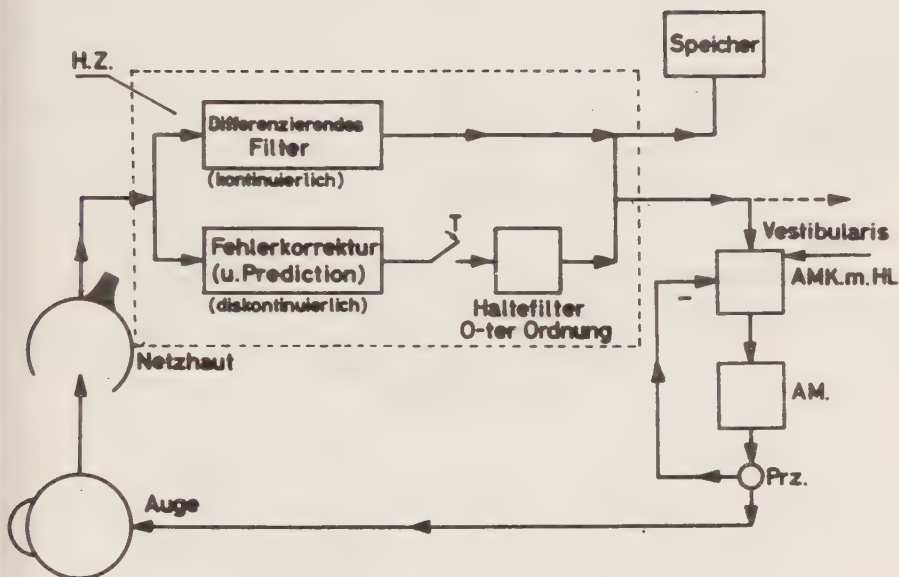


Abb. 1 Schematische Darstellung des gesamten Regelsystems der Augenbewegung.

H.Z. = Höhere Zentren; AMK. m.h.L. = Augenmuskelkerne mit hinterem Längsbündel; AM. = Augenmuskeln; Prz. = Proprioceptoren (nach Vossius (21)).

Frequenz der in der Vorgabe enthaltenen Schwingungen in Hz	0.3	0.5	0.7	1.0	1.3	1.7	2.3
Phasenverschiebungen zwischen Vorgabe und Folge	-25	-44.5	-44.5	-97	-19	- 8.5	-7
					-379	-368.5	-367

Tabelle 1 zeigt die Phasenverschiebung zwischen Vorgabe und Folge für die einzelnen Frequenzanteile beim nichtperiodischen Muster vom Typ A. - Kontinuierliches Ansteigen des Phasennachhaltes für alle Schwingungen bis zu 1 Hz. Über 1 Hz schwanken die Phasenwinkel regellos um 0° und 360° .

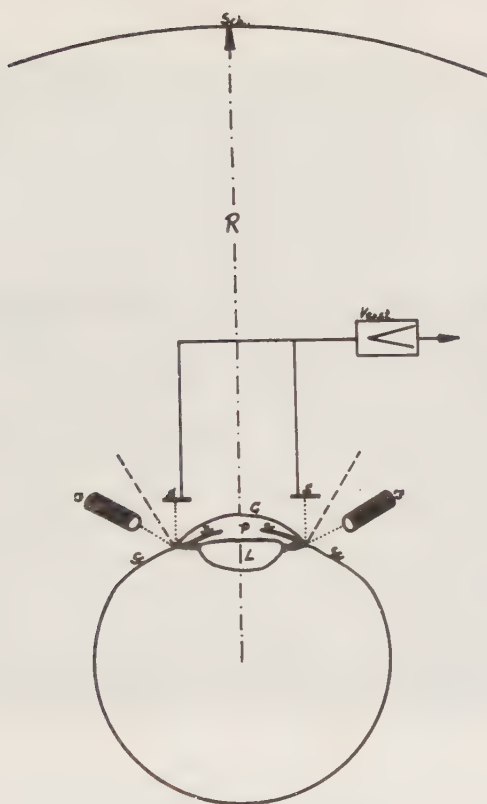


Abb. 2 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung.
 C = Cornea; I = Infrarotlämpchen; Ir = Iris;
 L = Linsenkörper; P = Pupillenweite; R = Radius;
 S = Solarzelle; Sc = Sclera; Sch = Schirm;
 Verst. = Verstärker.

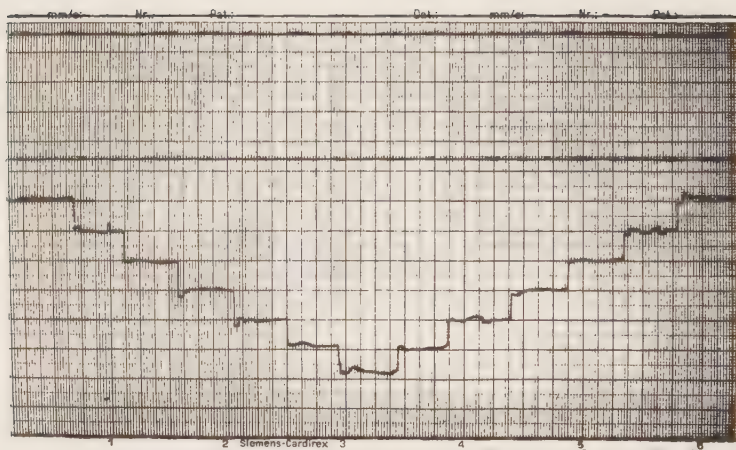


Abb. 3 Amplitudeneichung über 12° des Gesichtsfeldes in diskreten Abständen von 2° zur Bestimmung des Bereiches einer guten Linearität.

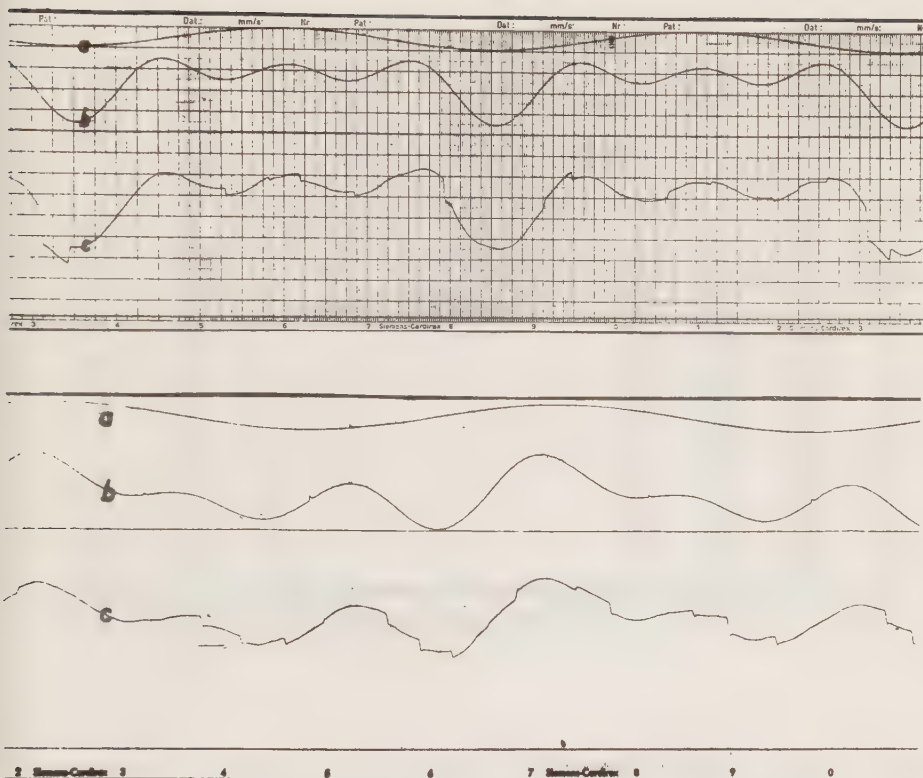


Abb. 4a Aus drei amplitudengleichen harmonischen Schwingungen
und zusammengesetztes "einfaches" (Abb. 4a) und "komplizier-
Abb. 4b tes" (Abb. 4b) periodisches Muster. Die Schwingungen
verhalten sich in ihren Frequenzen zueinander wie 1 : 2
: 3; ihre Phasenbeziehungen betragen beim "einfachen"
periodischen Muster 0° , 90° und 180° , beim "komplizier-
ten" periodischen Muster 0° , 270° und 270° . Die Grund-
wellengeschwindigkeit beider Muster beträgt hier 0.25 Hz.
a = Registrierung der Grundwelle zur Bestimmung der Pha-
senlage; b = Vorgabemuster; c = Folgekurve

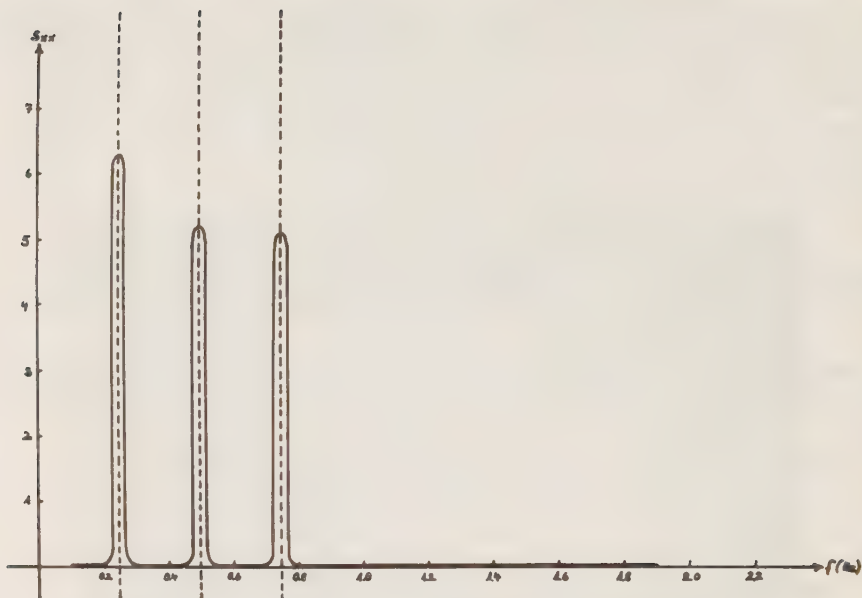


Abb. 5 Leistungsspektrum der Folgekurve bei Vorgabe eines sogenannten "einfachen" periodischen Musters (s. Abb. 4a). Die Grundwellenfrequenz beträgt 0.25 Hz. Alle Frequenzanteile der Vorgabe sind deutlich in der Folge enthalten.

Bezeichnung: Die senkrecht gestrichelten Linien bezeichnen die Lage der Sollfrequenzen. - Abszisse: Frequenz in Hz. Ordinate: willkürliche Einheiten.

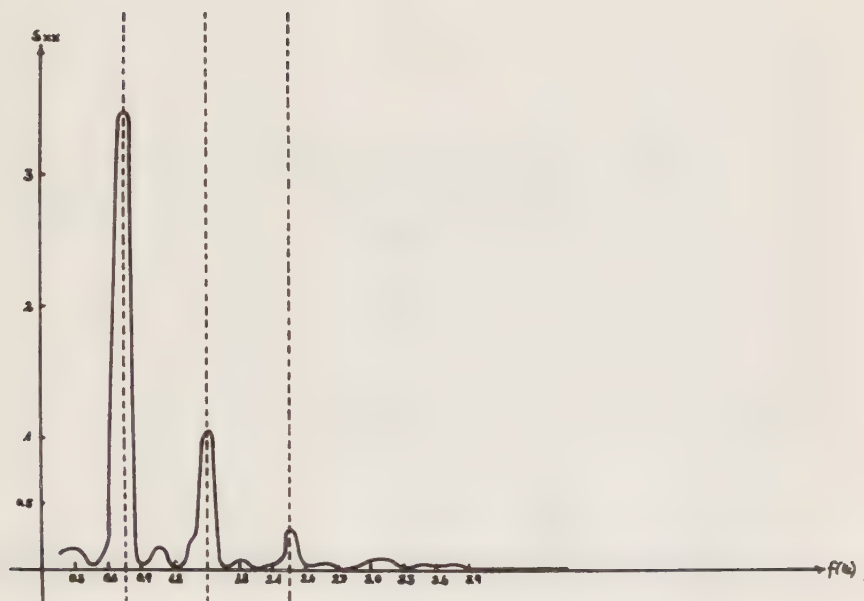


Abb. 6 Leistungsspektrum der Folgekurve bei Vorgabe eines sogenannten "einfachen" periodischen Musters (s. Abb. 4a). Die Grundwellenfrequenz beträgt 0.75 Hz. Alle drei Frequenzen treten im geforderten Bereich in Erscheinung, ihre Amplituden nehmen jedoch stetig von der langsamsten zur höchsten Schwingung ab. Es treten geringe Frequenzneubildungen auf. (Bezeichnung wie bei Abb. 5).

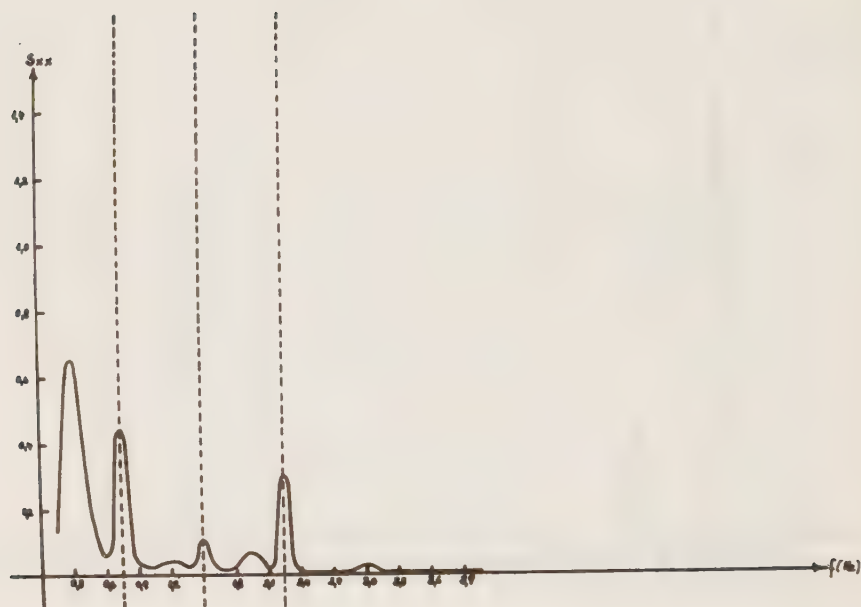


Abb. 7 Leistungsspektrum der Folgekurve bei Vorgabe eines sogenannten "komplizierten" periodischen Musters (s. Abb. 4b). Die Grundwellenfrequenz beträgt 0.75 Hz. In der Folgekurve sind nur die Grund- und die 2. Oberwelle enthalten, die 1. Oberwelle fehlt dagegen. Neben mehreren kleinen Wellen fällt eine sehr ausgeprägte Frequenzneubildung um 0.3 Hz auf, deren Amplitude die der Sollschrwingungen übersteigt.
(Bezeichnung wie bei Abb. 5).

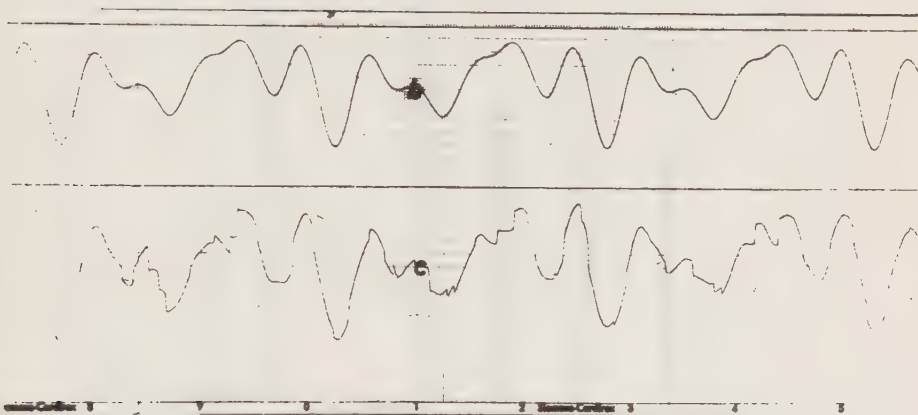


Abb. 8a Aus fünf amplitudengleichen harmonischen Schwingungen zusammengesetztes periodisches Muster. Die Schwingungen verhalten sich in ihren Frequenzen zueinander wie 1 : 2 : 3 : 4 : 5, ihre Phasenbeziehungen betragen 0° , 252° , 307° , 105° und 254° . Die Grundwellengeschwindigkeit beträgt hier 0.25 Hz; das Muster wird mit einem Papier-vorschub von 25 mm pro sec registriert.

b = Vorgabemuster; c = Folgekurve.

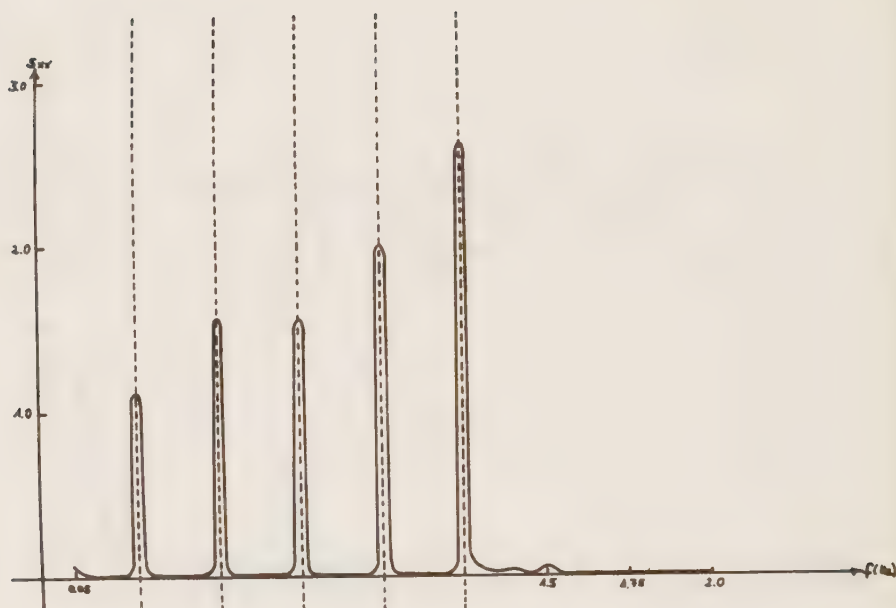


Abb. 8b Leistungsspektrum der Folgekurve bei Vorgabe eines periodischen Musters, entsprechend Abb. 8a. Die Grundwellengeschwindigkeit beträgt 0.25 Hz. Alle fünf Frequenzen der Vorgabe sind in der Folge eindeutig erhalten, ihre Amplituden nehmen ziemlich gleichmäßig von der langsamsten zur schnellsten Schwingung zu. Frequenzneubildungen fehlen. (Bezeichnung wie bei Abb. 5)

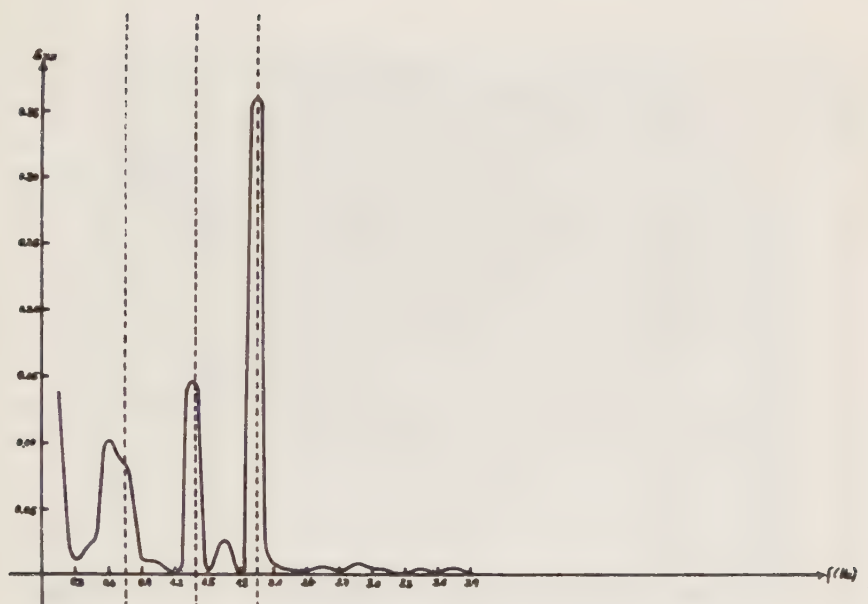


Abb. 9a Leistungsspektrum der Folgekurve bei Vorgabe eines aus fünf amplitudengleichen harmonischen Schwingungen zusammengesetzten nichtperiodischen Musters vom Typ A, wobei in diesem Versuch die (2. und 4.) Frequenz abgeschaltet wurden. Die Schwingungen verhalten sich in ihren Frequenzen zueinander wie 1.00 : 1.85 : 2.57 (siehe auch Text). Das Muster wird mit einer Geschwindigkeit der langsamsten Welle von 0.75 Hz dargeboten. (Bezeichnung wie bei Abb. 5).

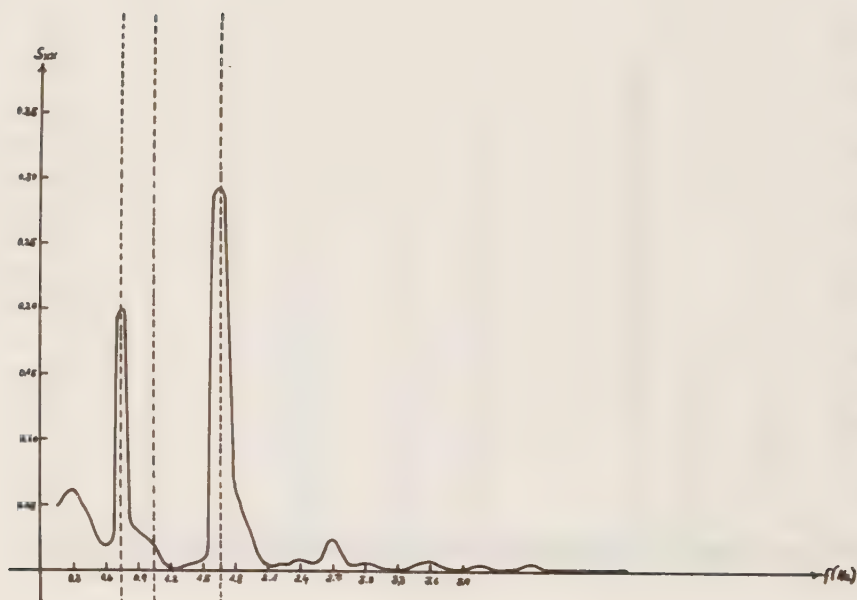


Abb. 9b Das gleiche Muster wie in Abb. 9a, aber mit abgeschalteter (3. und 5.) Frequenz. Die Frequenzverhältnisse betragen jetzt 1.00 : 1.36 : 2.26. Der Kurvenverlauf wird wesentlich schlechter und unvollständiger nachgebildet als bei abgeschalteter (2. und 4.) Frequenz, obwohl die Gesamtgeschwindigkeit des Musters hier geringer ist. (Bezeichnung wie bei Abb. 5).

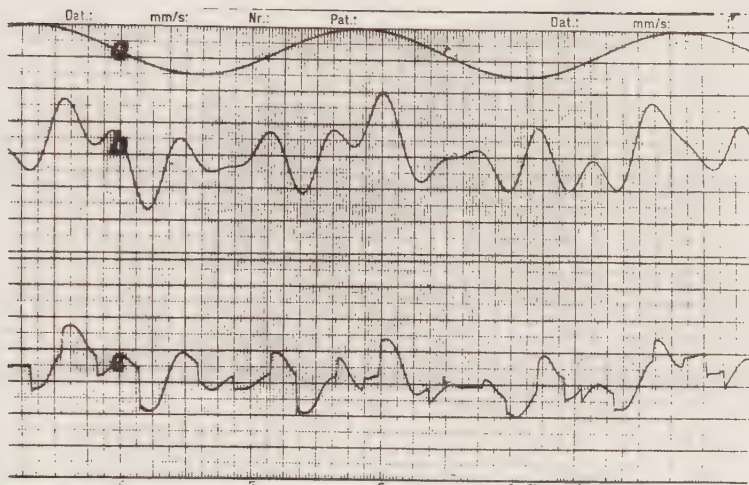


Abb. 1C Aus fünf amplitudengleichen harmonischen Schwin-
 gungen zusammengesetztes nichtperiodisches
 Muster vom Typ B. Die Schwingungen verhalten
 sich in ihren Frequenzen zueinander wie 1.00 :
 2.21 : 3.44 : 4.77 : 6.20. Das Muster wird hier
 mit einer Geschwindigkeit der langsamsten Welle
 von 0.25 Hz dargeboten.
 a = Registrierung der langsamsten Welle zur
 Bestimmung der Phasenlage; b = Vorgabemuster;
 c = Folgekurve.

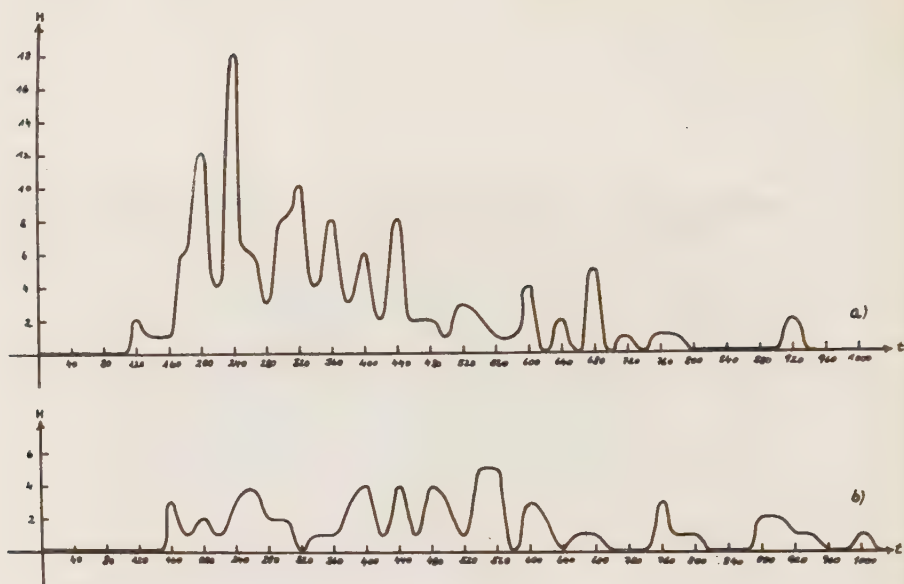


Abb. 11a Histogramm der Korrektursprünge einer Folgebewegung bei Vorgabe eines sogenannten nichtperiodischen Musters vom Typ B (s. Abb. 10) bei einer Geschwindigkeit der langsamsten Welle von 0.25 Hz. Im Histogramm fällt eine deutliche Bevorzugung der Sprungintervalle von ca. 240 msec auf.

Abb. 11b Histogramm der Korrektursprünge einer Folgekurve bei gleicher Vorgabe wie in Abb. 11a, aber mit erhöhter Geschwindigkeit der langsamsten Welle auf 0.5 Hz. Die zeitlichen Abstände zwischen den Sprüngen variieren stärker als bei langsamer Mustergeschwindigkeit. Eine besondere Bevorzugung bestimmter Zeitintervalle ist nicht festzustellen.
 (Die Abszisse gibt den Abstand zwischen den Sprüngen, die Ordinate die Häufigkeit der jeweils beobachteten Zeitintervalle wieder.)

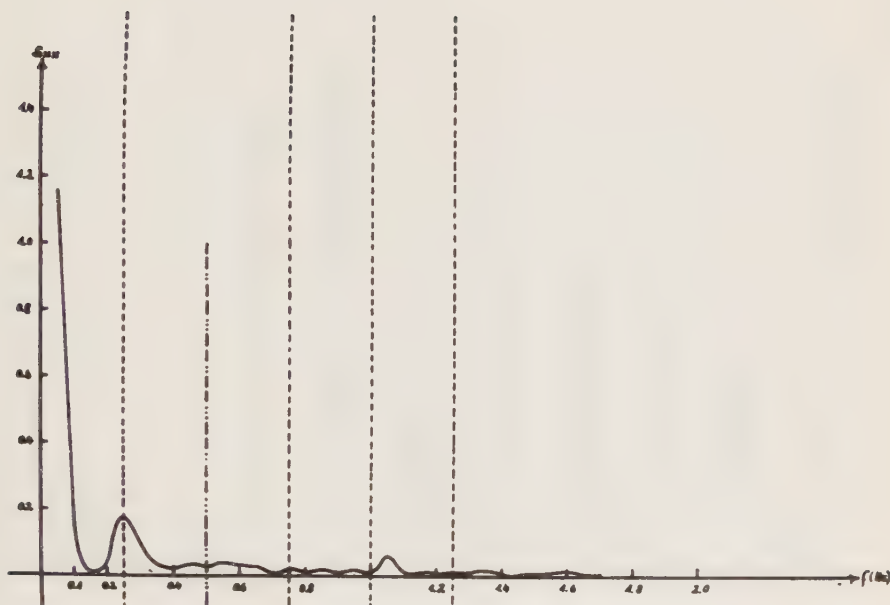


Abb. 12a Leistungsspektrum der Folgekurve bei getastet dargebotener Vorgabe eines aus fünf amplitudengleichen harmonischen Schwingungen zusammengesetzten periodischen Musters. Die Vorgabe wird hier mit einer Grundwellengeschwindigkeit von 0.25 Hz und mit einer Tastfrequenz von 0.5 Hz dargeboten. Von den geforderten Musteranteilen wird nur die niedrigste Schwingung frequenzgetreu, aber mit kleiner Amplitude wiedergegeben.

----- Sollfrequenzen; -.-.-.- Tastfrequenz, die hier mit der 1. Oberwelle zusammenfällt.

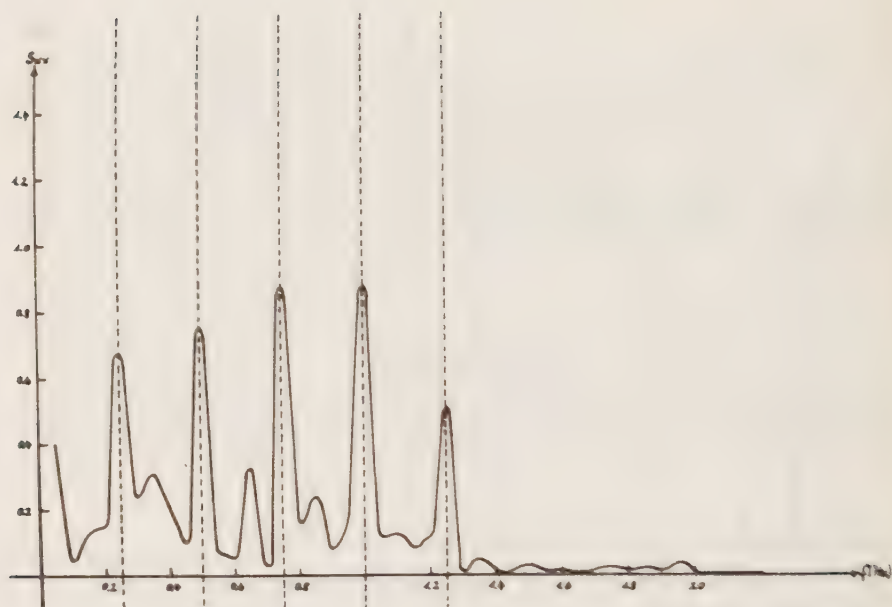


Abb. 12b Das gleiche Muster und mit derselben Geschwindigkeit wie in Abb. 12a, aber mit einer Tastfrequenz von 3 Hz dargeboten. Alle geforderten Musteranteile werden frequenzgetreu wiedergegeben, gleichzeitig treten Frequenzneubildungen auf. (Bezeichnung wie bei Abb. 5)

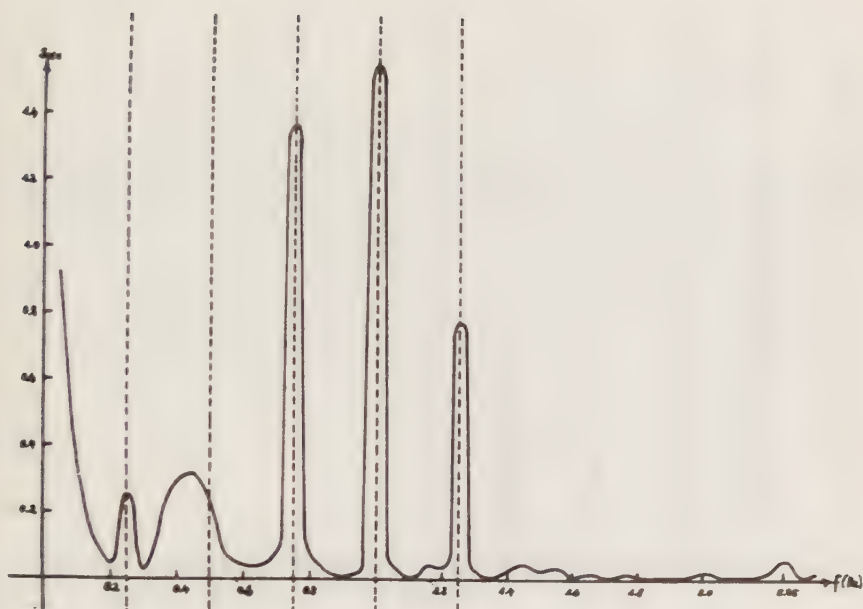


Abb. 12c Das gleiche Muster und mit derselben Geschwindigkeit wie in Abb. 12a, aber mit einer Tastfrequenz von 6 Hz dargeboten. Neuerliche Verschlechterung der Musterwiedergabe gegenüber Abb. 12b; nur die 3., 4. und 5. Frequenz werden vorbildgetreu befolgt. (Bezeichnung wie bei Abb. 5).

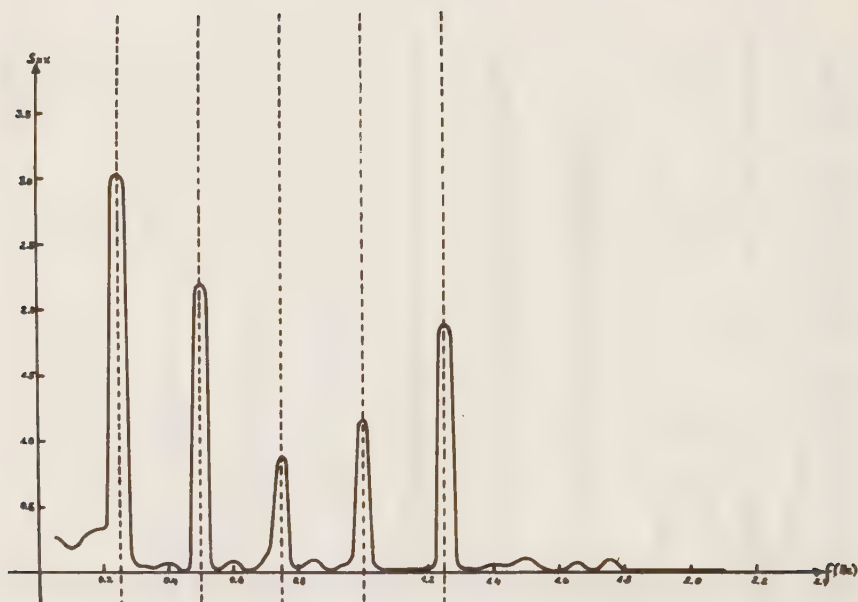


Abb. 12d Das gleiche Muster und mit derselben Geschwindigkeit wie in Abb. 12a, aber mit einer Tastfrequenz von 12 Hz dargeboten. Einwandfreie Musterwiedergabe. (Bezeichnung wie bei Abb. 5).

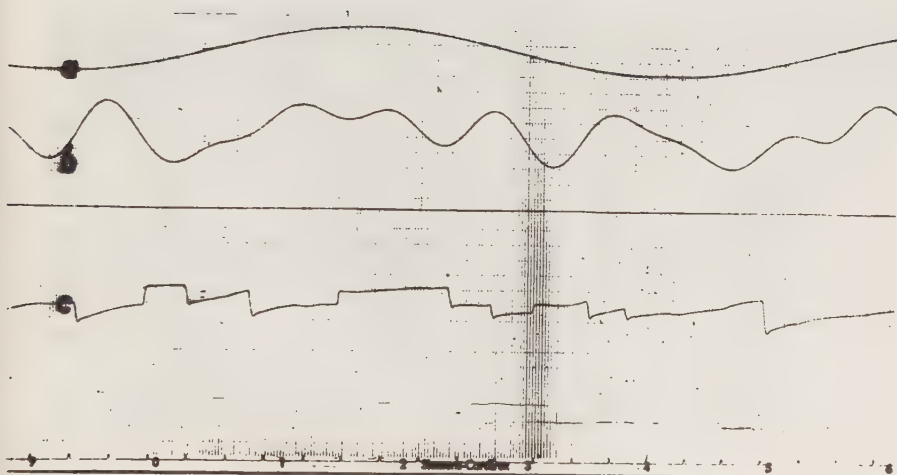


Abb. 13a Aus fünf amplitudengleichen harmonischen Schwingungen zusammengesetztes nichtperiodisches Muster vom Typ B (zum Vergleich s. Abb. 10). Die Vorgabe wird hier mit einer Geschwindigkeit der langsamsten Welle von 0.25 Hz und mit einer Tastfrequenz von 4 Hz dargeboten. Typische Folgekurve.
a = Registrierung der langsamsten Welle;
b = Vorgabemuster; c = Folgekurve.

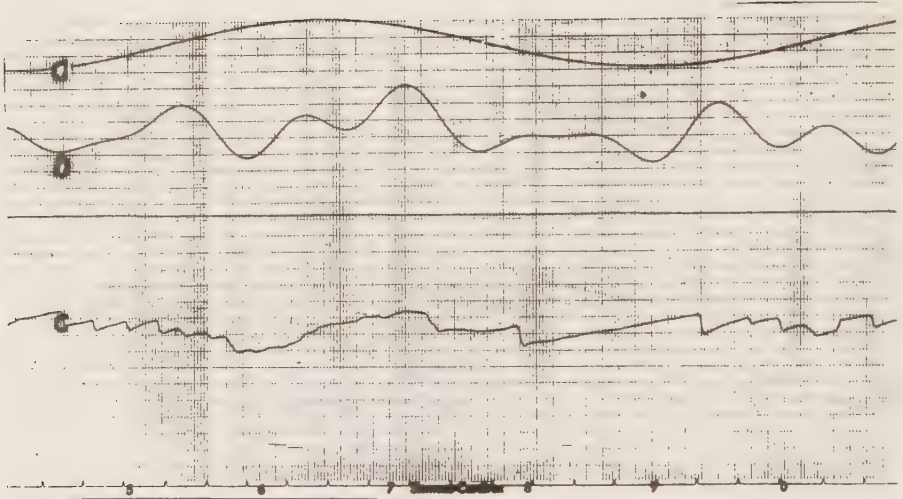


Abb. 13b Das gleiche Muster und mit derselben Geschwindigkeit und Tastfrequenz wie in Abb. 13a dargeboten. Mangelhafte Konzentrationsfähigkeit durch vorangegangene geistige Tätigkeit. Nach Zunahme der Korrektursprünge geht die Bewegung des Auges in eine kontinuierliche, von der Vorgabe unabhängige Bewegung über. Nach Anruf folgt die Versuchsperson vorbildgetreuer, um später erneut eine von der Vorgabe völlig abweichende Bewegung auszuführen.

a = Registrierung der langsamsten Welle;
b = Vorgabemuster; c = Folgekurve.

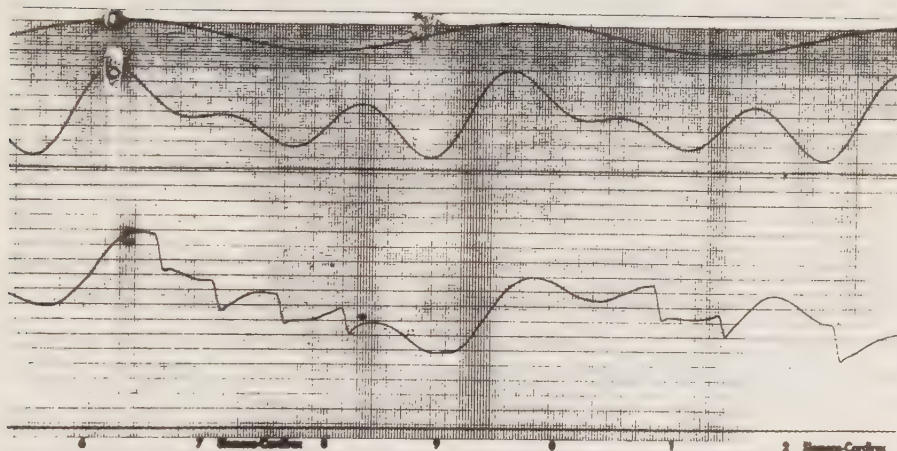


Abb. 14 Aus drei amplitudengleichen harmonischen Schwingungen zusammengesetztes "kompliziertes" periodisches Muster (s. Abb. 4b), das mit einer Grundwellengeschwindigkeit von 0.75 Hz dargeboten wird. Das kurzzeitige Verweilen in der Abwärtsbewegung des Signals nach dem Hauptgipfel wird fälschlicherweise als bevorstehende Richtungsänderung gewertet und mit Wiederanstieg des Kurvenverlaufes beantwortet. Die Fehlbewegung wird durch vermehrte Korrektursprünge auszugleichen gesucht.

a = Registrierung der Grundwelle;
b = Vorgabemuster; c = Folgekurve.

Herrn Prof. Dr. med. K. Wezler, dem Direktor des Institutes für Animalische Physiologie der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main, möchte ich an dieser Stelle für die gebotene Möglichkeit in seinem Institut experimentell arbeiten zu dürfen, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Das Thema dieser Arbeit wurde mir von Herrn Priv. Doz. Dr. med. G. Vossius überlassen, dem ich außerdem für die wertvolle Unterstützung, die er mir bei der Ausführung der Untersuchungen zuteil werden ließ, sehr danke.

L e b e n s l a u f .

Am 13. April 1939 wurde ich als Tochter des Reichsbahnrates Dr. Ing. Werner Sauermann und seiner Ehefrau Luise, geb. Andreas, in Berlin geboren.

Vom August 1945 bis Ostern 1949 besuchte ich die Volksschule in Hannover-Leinhausen und daran anschließend die Elisabeth-Granierschule (Mädchengymnasium) in Hannover. Infolge Versetzung meines Vaters wurde ich im August 1955 in die Cäcilienschule (Mädchengymnasium) in Oldenburg (Oldb.) umgeschult, an der ich im März 1958 meine Reifeprüfung ablegte.

Danach begann ich im Mai 1958 mit dem Medizinstudium an der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main.

Die naturwissenschaftliche Vorprüfung bestand ich im April 1959 mit der Note "sehr gut", die ärztliche Vorprüfung im Mai 1961 mit der Note "gut".

Im Wintersemester 1964/65 möchte ich das Staatsexamen ablegen.

Frankfurt am Main, den 25. Februar 1964

Ingrid Sauermann.

Verzeichnis meiner akademischen Lehrer:

Prof. Dr. med. W.Amelung	(Innere Medizin)
Prof. Dr. med., Dr. med.dent., Dr. phil. W.Artelt	(Geschichte der Medizin)
Prof. Dr. med. H.Betke	(Hygiene und Arbeitsmedizin)
Priv.Do. Dr. med. H.K.Brehm	(Geburtshilfe u.Frauenheil- kunde)
Prof. Dr. phil. M.Czerny	(Experimentalphysik)
Prof. Dr. phil.nat. H.Dänzer	(Angewandte Physik)
Priv.Do. Dr. med. R.Degkwitz	(Neurologie und Psychiatrie)
Prof. Dr. med. K.Felix	(Vegetative Physiologie)
Prof. Dr. med. J.Frey	(Innere Medizin)
Prof. Dr. med. H.Frick	(Anatomie)
Prof. Dr. med. R.Frowein	(Neurologie)
Prof. Dr. med. R.Geißendörfer	(Chirurgie)
Prof. Dr. med. J.Gerchow	(Gerichtliche und soziale Medizin)
Prof. Dr. phil. H.Giersberg	(Zoologie)
Prof. Dr. med. U.Graff	(Chirurgie)
Prof. Dr. med. K.Greven	(Physiologie)
Prof. Dr. med. E.Güntz	(Orthopädie)
Prof. Dr. rer.nat. W.Halbsguth	(Botanik)
Prof. Dr. med. E.Heinz	(Vegetative Physiologie)
Prof. Dr. med. L.Heller	(Geburtshilfe u.Frauenheil- kunde)
Prof. Dr. med. W.Hellriegel	(Medizinische Strahlenkunde)
Prof. Dr. med. F.Herrmann	(Dermatologie)
Prof. Dr. med. K.Herzberg	(Hygiene und Bakteriologie)
Prof. Dr. med. F.Hoff	(Innere Medizin)
Prof. Dr. med. P.Holtz	(Pharmakologie und Toxikologie)
Priv.Do. Dr. med. J.Hübener	(Physiologische Chemie)
Prof. Dr. med. J.Jürgens	(Innere Medizin)
Prof. Dr. med. G.Kahlau	(Allgemeine Pathologie und pathologische Anatomie)
Prof. Dr. med. O.Käser	(Geburtshilfe und Gynäkologie)
Prof. Dr. rer.nat. P.Kramp	(Anthropologie)
Prof. Dr. phil. W.Kuhl	(Kinematische Zellforschung)
Priv.Do. Dr. med. W.Kummer	(Anatomie)
Prof. Dr. med. E.Landes	(Dermatologie)

Prof. Dr. med. H.Lapp	(Allgemeine Pathologie und pathologische Anatomie)
Prof. Dr. med. G.Leonhardi	(Physiologische und klinische Chemie, Dermatologie)
Prof. Dr. med. W.A.Lieb	(Augenheilkunde)
Prof. Dr. med. K.Luff	(Gerichtliche und soziale Medizin)
Prof. Dr. med. H.Martin	(Innere Medizin)
Prof. Dr. med. R.Mittermaier	(Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde)
Prof. Dr. rer.nat. H.Müser	(Physik)
Prof. Dr. med. R.Ortmann	(Anatomie)
Priv.Do. Dr. med. J.E.Otto	(Augenheilkunde)
Prof. Dr. med. K.Pirlet	(Physikalisch-diätetische Therapie, Balneologie und Bioklimatologie)
Prof. Dr. phil.nat., Dr. med. h.c., Dr. med. h.c., Dr. med. h.c. B.Rajewsky	(Biophysik und physikalische Grundlagen der Medizin)
Prof. Dr. med. K.L.Radenbach	(Innere Medizin)
Prof. Dr. med.dent. J.von Reckow	(Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde)
Prof. Dr. phil.nat. W.Ried	(Organische Chemie)
Prof. Dr. med. L.Róka	(Physiologie und physiologische Chemie)
Prof. Dr. med. G.Rossberg	(Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde)
Prof. Dr. med. W.Rotter	(Pathologie)
Prof. Dr. phil.nat. P.Royen	(Anorganische Chemie)
Priv.Do. Dr. med. O.Schmith	(Sozialhygiene)
Priv.Do. Dr. med. G.Schmitt-Neuroth	(Physiologie)
Prof. Dr. med. R.Schneider	(Anatomie)
Priv.Do. Dr. med. H.Schoberth	(Orthopädie)
Prof. Dr. med. W.Schroeder	(Physiologie)
Prof. Dr. med. A.W.Schwenzer	(Geburtshilfe und Frauenheilkunde)
Prof. Dr. med. W.Siede	(Innere Medizin)
Prof. Dr. med. D.Starck	(Anatomie)
Prof. Dr. med. F.Strnad	(Röntgendiagnostik)
Prof. Dr. med. R.Thiel	(Augenheilkunde)
Prof. Dr. med. E.Ungeheuer	(Chirurgie)

Priv.Doiz. Dr. med. G.Vossius	(Physiologie und biologische Kybernetik)
Priv.Doiz. Dr. med. W.Weber	(Chirurgie und Urologie)
Prof. Dr. med. K.Weisse	(Kinderheilkunde)
Prof. Dr. med. E.Westermann	(Pharmakologie und Toxikologie)
Prof. Dr. med. K.Weizler	(Physiologie)
Priv.Doiz. Dr. med. E.Wiedemann	(Physikalische Therapie)
Prof. Dr. phil. T.Wieland	(Organische Chemie)
Priv.Doiz. Dr. med. R.Wolf	(Psychiatrie und Neurologie)
Prof. Dr. med. R.K.Zahn	(Physiologische Chemie und Physiologie)
Prof. Dr. med. H.Zimmermann	(Allgemeine Pathologie und pathologische Anatomie)
Prof. Dr. med. J.Zutt	(Psychiatrie und Neurologie)

Ehrenwörtliche Erklärung.

Ich erkläre ehrenwörtlich, daß ich die der Medizinischen Fakultät der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel "Untersuchungen über die Folgebewegung des menschlichen Auges bei kontinuierlich und gestastet dargebotenen Reizmustern" im Institut für Animalische Physiologie der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main unter Leitung von Herrn Priv.Do. Dr. med. G.Vossius mit seiner Unterstützung ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- und ausländischen Medizinischen Fakultät ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Vorliegende Arbeit wird zu einem späteren Zeitpunkt in einem noch nicht ausgewählten Publikationsorgan veröffentlicht.

Frankfurt am Main, den 25. Februar 1964

Ingrid Sauerbaum.

